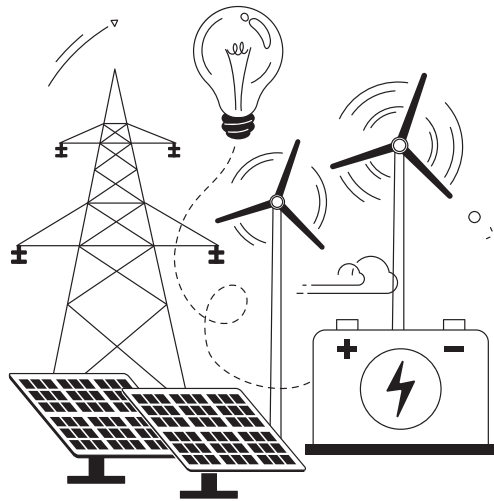


# 电力技术 与安全管理

Electric Power Technology and Safety Management



ART AND DESIGN PRESS INC.

(626 810 4480)

119 S Atlantic Blvd, Suite 300D

Monterey Park, CA 91754

Copyright © 2025 by ART AND DESIGN PRESS INC.

Complimentary Copy



## 编委 Editorial Board Member

贺喜巴特尔, 内蒙古能源发电杭锦发电有限公司

Bateer Hexi, Inner Mongolia Energy Power Generation Hangjin Power Generation Co., Ltd.

莫日更高娃, 内蒙古电力(集团)有限责任公司鄂尔多斯供电分公司

Gaowa Morigeng, Inner Mongolia Electric Power (Group) Co., LTD. Ordos Power Supply Branch

王娟, 内蒙古电力(集团)有限责任公司鄂尔多斯供电公司

Juan Wang, Inner Mongolia Electric Power (Group) Co., LTD. Ordos Power Supply Branch

谢超善, 北京必可测科技股份有限公司

Chaoshan Xie, Beijing BKC Technology Co., Ltd.



# 电力技术与安全管理

Electric Power Technology and Safety Management

第2卷 第4期 2025年4月刊

主管 ART AND DESIGN PRESS INC.

主办 ART AND DESIGN PRESS INC.

编辑 《电力技术与安全管理》编辑部

ISSN(O): 2997-3503

ISSN(P): 2997-3473

地址: 119 S Atlantic Blvd, Suite 300D Monterey  
Park, CA 91754

网址: <https://www.artdesignp.com>

## 本刊说明:

凡向本刊所投稿件, 全体作者需签署论文著作权  
转让声明书和论文发表承诺书, 声明、承诺及相关事  
项如下:

- 作者将论文的复制权、发行权、网络传播权、  
翻译权、汇编权、信息网络传播权、改编权等著  
作权在世界范围内免费转让给本刊。
- 论文不侵犯他人著作权和其他权利, 否则作者将  
承担由此产生的全部责任, 并赔偿由此给出版单  
位造成的全部损失。
- 论文署名作者享有该作品的完全著作权, 署名作  
者的身份真实。
- 论文未曾以任何形式公开发表过。
- 作者所投本刊稿件, 本刊编辑部拥有修改权。

## 电力系统 | POWER SYSTEM

- |     |  |              |
|-----|--|--------------|
| 001 | 电气自动化在精细化工中的应用: DCS 系统控制技术的创新实践  | 吴师威          |
|     | The Application of Electrical Automation in Fine Chemicals:<br>Innovative Practice of DCS System Control Technology          | Wu Shiwei    |
| 004 | 高速同步测量模块 DA 电压电流电路的低时延设计方法   | 朱志忠          |
|     | Low-Latency Design Method for DA Voltage and Current Circuits<br>in High-Speed Synchronous Measurement Modules               | Zhu Zhizhong |
| 007 | 5G+ 智能电网背景下电力通信网络切片技术优化与可靠性提升策略  | 李玉娇          |
|     | 5G Smart Grid Background Power Communication Network<br>Slicing Technology Optimization and Reliability Enhancement Strategy | Li Yujiao    |
| 010 | 分布式光伏对低压台区电压分布的影响及优化措施   | 崔磊           |
|     | Impact and Optimization Measures of Distributed Photovoltaic on Voltage<br>Distribution in Low Voltage Distribution Network  | Cui Lei      |
| 013 | 汽轮机通流部分改造对电厂运行效率提升的影响分析  | 董赫伦          |
|     | Analysis of the Impact of Steam Turbine Flow Section Renovation<br>on Power Plant Operating Efficiency Improvement           | Dong Helun   |
| 016 | 人工智能驱动的风电机叶片气动性能智能优化方法   | 韦昌虎          |
|     | Intelligent Optimization Method for Aerodynamic Performance of<br>Wind Turbine Blades Driven by Artificial Intelligence      | Wei Changhu  |
| 019 | 燃煤电厂输煤皮带跑偏原因分析及综合治理方案  | 高卫龙          |
|     | Analysis of Reasons and Comprehensive Treatment Scheme<br>of Coal Conveyor Belt Deviation in Coal-Fired Power Plant          | Gao Weilong  |
| 022 | 电厂厂区分布式光伏发电系统设计及效益评估   | 罗若阳          |
|     | Design and Benefit Evaluation of Distributed Photovoltaic<br>Power Generation System in Power Plant Area                     | Luo Ruoyang  |

## 技术研究 | TECHNICAL RESEARCH

- |     |   |                 |
|-----|---|-----------------|
| 025 | 火电厂一次电气系统可靠性评估与提升措施研究   | 袁志华             |
|     | Study on Reliability Assessment and Improvement Measures<br>of Primary Electrical System in Thermal Power Plant     | Yuan Zhihua     |
| 028 | 火电机组碳排放特性研究及管理建议  | 张昌兴             |
|     | Study on Carbon Emission Characteristics of Thermal Power<br>Units and Management Suggestions                       | Zhang Changxing |
| 031 | 智能变电站继电保护调试技术优化与故障诊断研究  | 巨欣悦             |
|     | Optimization of Relay Protection Commissioning Technology and<br>Fault Diagnosis Research in Smart Substation       | Ju Xinyue       |
| 034 | 引言数字化转型背景下电力营销精准服务模式创新研究  | 李欣              |
|     | Innovation Research on Precision Service Model of Power Marketing<br>under the Background of Digital Transformation | Li Xin          |
| 037 | 多传感器融合的智能仓储 AGV 导航控制与路径优化研究   | 孙健鹏             |
|     | Research on Sensor Fusion-Based Navigation Control and Path<br>Optimization for Intelligent Warehouse AGVs          | Sun Jianpeng    |

040	<b>基于人工智能的火电机组热控系统优化与故障诊断研究</b> Research on Optimization and Fault Diagnosis of Thermal Control System for Thermal Power Units Based on Artificial Intelligence	冯栋, 张向伟, 何龙, 巩家庆, 姬广丰 Feng Dong, Zhang Xiangwei, He Long, Gong Jiaqing, Ji Gangfeng
043	<b>光储充一体化电站的电气自动化控制策略研究</b> Research on Electrical Automation Control Strategy for Integrated Photovoltaic-Storage-Charging Power Station	吴俊强 Wu Junqiang
046	<b>配电系统高低压设备安装调试及送电技术优化研究</b> Optimization Research on Installation, Commissioning, and Energization Techniques for High and Low Voltage Equipment in Power Distribution Systems	李湛杰 Li Zhanjie
049	<b>浓相气力输灰系统堵管机理及基于压力 – 流量耦合的智能预警方法研究</b> Study on Pipe Blockage Mechanism of Thick Gas Power Ash Conveying System and Intelligent Early Warning Method Based on Pressure-Flow Coupling	袁汉 Yuan Han
052	<b>电厂工程施工中的环境影响评估与减缓措施探讨</b> Environmental Impact Assessment and Mitigation Measures in Power Plant Construction	李贺 Li He

# 电气自动化在精细化工中的应用： DCS 系统控制技术的创新实践

吴师威

广州白云科技股份有限公司，广东 广州 510000

DOI:10.61369/EPTSM.2025040003

**摘 要：**介绍了 DCS 系统架构、功能等，阐述其在精细化工的应用及挑战，如反应釜控制、分离装置联锁等。探讨了 MPC、神经网络前馈补偿等创新技术，还涉及企业案例中的异构设备接入等。强调了技术经济性及跨领域推广，展望了未来发展。

**关 键 词：**DCS 系统；精细化工；自动化控制

## The Application of Electrical Automation in Fine Chemicals: Innovative Practice of DCS System Control Technology

Wu Shiwei

Guangzhou Baiyun Technology Co., LTD, Guangzhou, Guangdong 510000

**Abstract：** The architecture and functions of the DCS system are introduced, and its application and challenges in fine chemicals are expounded, such as reactor control and interlocking of separation devices. Innovative technologies such as MPC and neural network feedforward compensation were discussed, and the access of heterogeneous devices in enterprise cases was also involved. The technical economy and cross-field promotion were emphasized, and the future development was prospected.

**Keywords：** DCS system; fine chemical industry; automatic control

### 引言

精细化工生产具有间歇式生产、多变量耦合等特点，对自动化系统要求极高。近年来，随着我国《中国制造 2025》（2015 年颁布）等政策的推动，制造业向智能化、自动化方向发展。在此背景下，电气自动化在精细化工中的应用备受关注。DCS 系统作为一种先进控制系统，在精细化工生产中应用广泛，其体系架构、硬件组成及核心功能模块都对精细化工生产过程的控制起到关键作用。同时，面对精细化工复杂生产情况带来的挑战，DCS 系统不断创新，如采用多变量模型预测控制、神经网络前馈补偿机制等技术，推动精细化工行业朝着更高效、更智能的方向发展。

### 一、DCS 系统控制技术概述

#### （一）DCS 系统概念与关键技术

分散控制系统（DCS）是一种综合了计算机技术、控制技术、通信技术和显示技术的先进控制系统。其体系架构通常采用分层分布式结构，包括现场控制层、过程控制层和操作管理层。硬件组成涵盖控制器、输入输出模块、操作站、工程师站等。核心功能模块有控制算法模块、数据采集与处理模块等。

冗余容错技术是 DCS 系统的重要特性之一，通过硬件冗余和软件算法，确保系统在部分组件故障时仍能正常运行<sup>[1]</sup>。实时数据库技术能够快速存储和检索大量实时数据，满足系统对数据处理

的及时性要求。通信网络技术则保障了系统各组件之间的高效、稳定通信，确保数据的准确传输。

#### （二）精细化工生产特点与自动化需求

精细化工生产具有间歇式生产、多变量耦合等特点。间歇式生产要求自动化系统能灵活适应不同生产阶段的参数变化，实现精准控制<sup>[2]</sup>。多变量耦合意味着多个工艺变量相互影响，如温度、压力、流量等，需要自动化系统能够综合考虑这些变量的关系进行协调控制。在精密温控方面，某些精细化工产品的生产对温度的精度要求极高，自动化系统需具备高精度的温度控制能力。对于批量追踪，由于精细化工产品往往具有批次性，需要自动化系统能够准确记录和追溯每一批次产品的生产过程信息，包括原料

来源、生产时间、工艺参数等，以确保产品质量和安全性。

## 二、DCS 在精细化工应用现状分析

### （一）典型应用场景及技术路线

在精细化工中，DCS 系统在反应釜控制方面有重要应用。通过对反应釜温度、压力、物料流量等关键参数的实时监测与精确控制，确保反应过程的稳定性和安全性<sup>[3]</sup>。例如，采用先进的传感器技术获取准确数据，结合 DCS 的强大运算能力实现精准调控。在分离装置联锁应用中，DCS 系统能够根据不同的分离工艺要求，对相关设备进行联锁控制。如在精馏过程中，严格控制温度、压力和液位等参数，确保产品质量。同时，综合运用传统 PID 控制的稳定性和先进控制策略的高效性，形成组合方案。PID 控制用于基础的稳定调节，先进控制策略则针对复杂工况进行优化，提高整个系统的控制性能。

### （二）复杂反应控制的技术瓶颈

在精细化工中，多元物料混合以及非线性动态响应等复杂情况给 DCS 系统带来诸多挑战。现有系统在自适应调节方面存在明显局限，难以根据物料混合比例的实时变化以及反应过程中的非线性动态特征迅速做出精准调整<sup>[4]</sup>。在参数优化上，由于精细化工反应的复杂性，系统无法全面考虑各种因素对反应的影响，导致参数设置往往不能达到最佳状态。例如，在某些涉及多种催化剂和反应物的反应中，DCS 系统可能无法准确识别不同物料之间的相互作用对反应速率和产物质量的影响，从而无法对相关参数进行有效优化。这不仅影响生产效率，还可能导致产品质量不稳定。

## 三、DCS 控制技术创新路径

### （一）过程控制算法优化

#### 1. 多变量模型预测控制（MPC）

多变量模型预测控制（MPC）在 DCS 控制技术创新路径中具有重要地位。它基于构建的精细化工反应动力学模型，通过设计滚动时域优化算法来实现多目标协同控制。MPC 能够考虑多个变量之间的相互关系以及系统的动态特性，对未来的过程行为进行预测，并根据预测结果进行优化控制决策。这种控制策略可以有效应对精细化工过程中的复杂动态变化和多目标优化需求，提高生产过程的稳定性和产品质量。通过不断优化算法和模型参数，MPC 能够更好地适应不同的工况和生产要求，为精细化工的自动化生产提供更高效、精确的控制手段<sup>[5]</sup>。

#### 2. 动态补偿解耦策略

开发基于神经网络的前馈补偿机制，以应对精细化工工艺流程中的强耦合干扰问题。神经网络具有强大的非线性映射能力，能够学习和逼近复杂的系统动态特性。通过构建合适的神经网络结构，将工艺过程中的相关变量作为输入，经过神经网络的训练和学习，输出相应的前馈补偿信号。这种前馈补偿机制可以在干扰发生之前就对系统进行调整，有效地减少耦合干扰对系统控制

性能的影响。例如，在某些精细化工反应过程中，温度、压力和流量等变量之间存在着复杂的耦合关系，采用基于神经网络的前馈补偿机制，可以实时监测这些变量的变化，并及时提供补偿信号，提高系统的稳定性和控制精度<sup>[6]</sup>。

### （二）智能系统集成创新

#### 1. 数字孪生技术融合

搭建虚实映射的数字化产线模型是数字孪生技术融合的关键。通过精确的建模技术，将精细化工生产中的物理设备、工艺流程等在虚拟环境中进行重现，构建出与实际产线高度吻合的数字化模型。在此基础上，实现控制系统与物理设备的实时交互验证。利用虚拟模型对 DCS 控制系统的策略、算法进行测试和优化，提前发现潜在问题并进行调整。同时，物理设备的运行数据实时反馈至虚拟模型，使其不断更新和完善，形成一个闭环的优化系统，从而提高精细化工生产过程的控制精度和效率，提升整体生产质量和安全性<sup>[7]</sup>。

#### 2. 边缘计算部署方案

设计分布式边缘控制器架构，将计算和数据存储推向网络边缘，靠近数据源和用户。这种架构能够显著减少数据传输延迟，提高系统的实时性和响应速度。通过本地化数据处理，避免了大量数据传输至云端或中心服务器进行处理所带来的网络拥塞和延迟问题。例如，在精细化工生产过程中，现场传感器产生的大量实时数据可在边缘控制器进行即时处理和分析，快速反馈控制指令，确保生产过程的稳定性和安全性。同时，分布式边缘控制器架构还增强了系统的可靠性和容错能力，即使部分节点出现故障，其他节点仍能继续工作，维持系统的正常运行<sup>[8]</sup>。

## 四、创新应用实践验证

### （一）某精细化学品企业案例研究

#### 1. 工艺装置改造方案

在该精细化学品企业案例中，异构设备接入是关键技术之一。其涉及到不同品牌、不同型号设备的兼容性问题。通过特定接口和适配模块，实现设备的有效连接，确保数据的稳定传输<sup>[9]</sup>。同时，OPC UA 协议转换也至关重要。该企业采用先进的转换技术，将不同协议的设备数据统一转换为 OPC UA 协议，实现了数据的标准化和规范化。这不仅提高了系统的集成度，还方便了数据的管理和分析。在系统集成过程中，严格把控关键技术参数，确保设备接入的准确性和协议转换的高效性，从而提升了整个工艺装置的自动化水平和生产效率。

#### 2. 控制逻辑重构设计

在某精细化学品企业案例中，DCS 系统控制技术的创新应用涉及到图解顺序控制 SFC 与连续控制 CFC 的复合编程架构及联调测试流程。首先构建复合编程架构，将 SFC 的顺序逻辑与 CFC 的连续控制功能有机结合，以满足精细化工生产过程中复杂的控制需求。例如，在反应釜的温度和压力控制中，利用 SFC 确保加料、反应、出料等操作按顺序进行，同时通过 CFC 精确调节温度和压力值。在联调测试流程方面，需对整个复合控制逻辑进行全

面测试，包括模拟各种工况条件，检查控制逻辑的准确性和稳定性，确保系统在实际生产中能够可靠运行<sup>[10]</sup>。

### （二）系统运行效能分析

#### 1. 关键指标对比实验

针对电气自动化在精细化工中应用的 DCS 系统控制技术，开展核心指标的三维度对照实验。在批次稳定性维度，设置不同的控制参数组，对比各批次产品质量的波动情况，观察 DCS 系统对生产过程稳定性的影响。对于能耗节约率维度，记录不同工况下的能耗数据，分析 DCS 系统在优化能源利用方面的表现。通过这些关键指标的对比实验，全面评估 DCS 系统的运行效能。实验结果将为进一步优化系统提供数据支撑，也为电气自动化在精细化工领域的应用提供更具有说服力的实践依据。

#### 2. 可靠性验证方法

采用故障树分析法（FTA）评估系统 MTBF 值，以确定系统的平均无故障时间。通过对系统可能出现的故障模式进行分析，构建故障树模型，从而计算出系统的可靠性指标。同时，展示冗余切换成功率等关键数据，以验证系统在部分组件故障时的切换能力。冗余切换成功率的高低直接影响系统的连续运行能力，高成功率意味着系统在面临故障时能够迅速切换到备用组件，保证生产过程的连续性。这些可靠性验证方法为系统的稳定运行提供了有力支持，确保电气自动化在精细化工中的应用能够满足生产需求，提高生产效率和质量。

### （三）行业推广价值探讨

#### 1. 技术经济性评估模型

建立全生命周期成本分析框架，对于评估电气自动化在精细化工中应用的技术经济性至关重要。需考虑从设备采购、安装调试、运行维护到最终报废的各个阶段成本。通过准确量化投资回收期与边际效益关系，可直观了解应用该技术的经济可行性。投

资回收期越短，边际效益越高，则应用价值越大。同时，要结合精细化工行业特点，考虑生产规模、产品质量提升、能源消耗降低等因素对成本和效益的影响。这样才能全面、准确地评估 DCS 系统控制技术在精细化工中的技术经济性，为行业推广提供有力依据。

#### 2. 跨领域应用延伸路径

电气自动化中 DCS 系统控制技术在精细化工的创新应用，为其跨领域推广提供了基础。在制药行业，其对生产环境和流程控制的严格要求与精细化工有相似之处。DCS 系统的高精度控制策略可确保药品生产过程中温度、压力、流量等关键参数的精准调控，保障药品质量的稳定性。对于特种材料行业，同样需要精确的生产条件控制。DCS 系统能够根据不同材料的生产工艺要求，灵活调整控制参数，实现对生产过程的优化。通过对这些相似行业生产特点和需求的分析，结合 DCS 系统已有的技术优势，可以制定出切实可行的控制策略移植方案，从而实现电气自动化技术在更多领域的应用和推广。

## 五、总结

电气自动化在精细化工中的应用是一个不断发展的领域。DCS 系统控制技术的创新实践在精细化工生产中具有核心贡献。通过对该技术的应用，生产过程的控制更加精准和高效，提升了生产效能。智能控制算法与系统集成的协同优化是关键，这种协同不仅提高了系统的稳定性和可靠性，还优化了生产流程，降低了生产成本。在 5G+ 工业互联网的背景下，控制系统将朝着更智能、更高效、更集成的方向演进。未来，有望实现设备之间的无缝连接和实时数据交互，进一步提高精细化工生产的自动化水平和质量控制能力，为精细化工行业的发展提供更强大的技术支持。



# 高速同步测量模块 DA 电压电流电路的低时延设计方法

朱志忠

中国科学院微电子研究所, 北京 100029

DOI:10.61369/EPTSM.2025040004

**摘要：**本文针对高速同步测量系统中 DA 电压电流电路时延制约问题，提出了一套完整的低时延设计方法。研究目的在于解决传统 DA 电路建立时间过长、多通道同步精度不足等技术难题，实现皮秒级时延控制和高精度同步测量。通过深入分析时延产生机理，重点研究了电流输出电路拓扑优化、高速同步控制策略和布局布线技术。设计方案采用电流输出型 DAC 配合精密 I-V 转换，建立时间压缩至 25ns 以内，通过差分信号传输和阻抗匹配技术确保信号完整性，多通道延时匹配精度达到  $\pm 0.1\text{ns}$ 。测试结果表明，所设计的 DA 电路系统总延时小于 50ns，通道间同步精度优于  $\pm 100\text{ps}$ ，频率响应平坦度在工作带宽内保持  $\pm 0.5\text{dB}$ 。

**关键词：**高速同步测量模块；DA 电压电流电路；低时延设计

## Low-Latency Design Method for DA Voltage and Current Circuits in High-Speed Synchronous Measurement Modules

Zhu Zhizhong

Institute of Microelectronics of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

**Abstract：** This paper presents a complete low-latency design method to address the latency constraints of DA voltage and current circuits in high-speed synchronous measurement systems. The research aims to solve technical challenges such as long settling times in traditional DA circuits and insufficient multi-channel synchronization accuracy, achieving picosecond-level latency control and high-precision synchronous measurement. Through deep analysis of latency generation mechanisms, the study focuses on optimizing current output circuit topology, high-speed synchronous control strategies, and layout and routing techniques. The design scheme employs a current output DAC combined with a precision I-V conversion, reducing the settling time to less than 25ns. Differential signal transmission and impedance matching techniques ensure signal integrity, with a multi-channel delay matching accuracy of  $\pm 0.1\text{ns}$ . Test results demonstrate that the designed DA circuit system achieves a total delay of less than 50ns, inter-channel synchronization accuracy better than  $\pm 100\text{ps}$ , and a frequency response flatness maintained within  $\pm 0.5\text{dB}$  over the operating bandwidth.

**Keywords：** high-speed synchronous measurement module; DA voltage and current circuit; low-latency design

## 引言

随着现代测量技术向高速化、高精度化方向发展，同步测量系统在电力系统保护、雷达信号处理、通信基站测试等领域发挥着越来越重要的作用。传统的 DA 转换电路由于建立时间长、通道间延时不匹配等问题，已经成为制约系统整体性能提升的关键瓶颈。特别是在多通道高速同步测量应用中，各通道间微秒级的时延差异就可能导致测量结果的严重偏差，影响系统的可靠性和准确性。深入研究高速同步测量模块 DA 电路的低时延设计方法，掌握核心技术原理，对于提升我国精密测量装备的技术水平具有重要意义。

## 一、时延产生机理分析

在高速同步测量系统中，DA 转换电路的时延往往是制约整体性能的关键瓶颈，其复杂性远超表面认知。DA 电路的总时延实际

上是多个物理过程的叠加结果，主要源于三个核心层面的时延累积。首先是 DA 转换器内部的固有时延，包括建立时间、传播延迟和码转换毛刺，其中建立时间是指输出信号稳定在最终值  $\pm 0.5\text{LSB}$  范围内所需的时间，对于典型的 12 位 1MSPS DAC 约为 200-

课题名称：高压高速脉冲产生和任意波信号产生及同步测量模组设计，课题号：2023YFF0717903，课题来源：科技部国家重点研发计划。

作者简介：朱志忠（1986.02-），高级工程师，现工作于中国科学院微电子研究所，主要研究方向：光电精密测量、绝对测距及其电子学设计。



500ns, 主要受内部电流源切换速度限制; 传播延迟为数字输入到模拟输出开始响应的纯延时, 一般为 10–50ns; 码转换毛刺在大幅值跳变时产生瞬态尖峰需额外稳定时间。其次是外围电路引入的附加时延, 输出缓冲放大器是主要贡献源, 以 OPA847 为例, 35MHz 带宽对应约 5ns 时延, 大信号条件下 150V/ $\mu$ s 压摆率限制会显著延长建立时间; 滤波电路群延时同样关键, 三阶巴特沃斯滤波器在 100MHz 截止频率处约产生 5ns 延时; PCB 走线按 150ps/英寸计算, 5cm 走线约 3ns 延时。最后是数字控制逻辑的系统时延, 包含 SPI 通信和寄存器更新延时, 时钟域切换引入 2–3 个时钟周期延时, 多通道系统的数据同步误差典型值为  $\pm 1$  个时钟周期<sup>[1]</sup>。

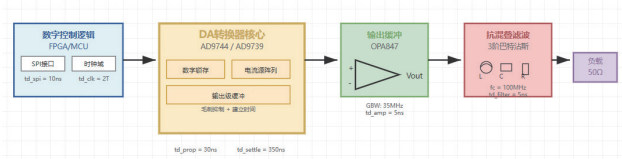


图 1 高速同步测量模块 DA 电路时延机理

## 二、高速同步测量模块 DA 电压电流电路的低时延设计的技术难点

高速同步测量模块 DA 电路的低时延设计面临着多重技术挑战, 这些难点往往相互交织, 形成了复杂的设计约束条件。首要难点在于器件固有特性与系统性能需求之间的矛盾, 传统 DA 转换器的建立时间通常在数百纳秒量级, 而高速同步测量要求系统总延时控制在几十纳秒以内, 这就需要在器件选型时进行精细化权衡, 既要保证转换精度又要满足速度要求。同时, 高速信号处理过程中的信号完整性问题日益突出, PCB 寄生参数、走线不连续性和电磁干扰都会引入额外的延时和失真, 传统的设计经验往往无法直接适用于皮秒级精度的时延控制场合。

多通道同步问题的复杂性远超表面认知, 各通道间的延时匹配要求苛刻得令人咋舌, 哪怕几个皮秒的偏差都可能引发系统性能显著下降。工艺制造中不可避免的微小差异、环境温度细微波动, 甚至器件长期使用后的特性漂移, 这些看似微不足道的因素都会悄然破坏通道间的精确对齐。更让人头疼的是, 时钟分配网络的设计, 既要确保每路时钟信号的纯净度, 又要实现各分支间严丝合缝的相位匹配, 往往让经验丰富的工程师都感到棘手。

## 三、高速同步测量模块 DA 电压电流电路的低时延设计方法

### （一）低时延 DA 电压输出电路设计

高速 DA 电压输出电路的低时延实现关键在于合理的电路拓扑选择和精细化信号链设计, 电流输出电路拓扑具备天然的速度优势, 应优先采用电流输出型 DAC 配合精密 I–V 转换的方案。具体实施时, 选择 AD9739A 等高速电流输出 DAC, 其省去内部电压缓冲级, 建立时间可压缩至 25ns 以内。I–V 转换采用跨阻放大器结构, 反馈电阻精确匹配 DAC 满量程输出电流, 典型配置为 20mA 对应 500 $\Omega$ 。运算放大器选用 OPA847 等宽带器件, 35MHz 增益带宽积满足高速响应, 150V/ $\mu$ s 压摆率确保大信号快速建立。

负载匹配与阻抗控制直接影响信号完整性和反射延时, 整个信号链严格按 50 $\Omega$  特征阻抗设计, DAC 输出端通过精密电阻网络实现阻抗匹配。PCB 走线宽度精确计算, 标准 4 层板表层 0.2mm 走线可实现 50 $\Omega$  阻抗, 差分信号对间距控制在走线宽度 2–3 倍确保 100 $\Omega$  差分阻抗。终端匹配电阻需平衡功耗和线性度, 串联匹配适用于弱驱动输出, 并联匹配适用于低阻抗驱动, 负载电容总和应控制在 5pF 以内, 最小化寄生延时<sup>[2]</sup>。

共模抑制与隔离设计确保多通道系统的独立性和测量精度, 差分信号传输提供优秀共模抑制, 差分对走线长度匹配精度达  $\pm 0.1$ mm, 对应延时匹配  $\pm 0.7$ ps。共模扼流圈有效抑制共模噪声, 需选择低延时型号。电源隔离采用分离式设计, 数字和模拟电源通过磁珠隔离, 每通道模拟电源独立供电避免相互干扰。接地采用星形单点接地, 模拟地和数字地在电源入口单点连接。屏蔽设计中信号走线远离开关电源和数字时钟, 敏感信号下方设置完整接地平面。

### （二）低时延 DA 电流输出电路设计

电流输出模式在超低时延 DA 转换应用中有显著优势, 其能够有效规避传统电压输出方式中繁杂的内部缓冲级联结构, 实现信号建立时间的大幅优化。实际设计中, 核心思路在于构建简洁高效的电流驱动链路, 并对负载特性进行精细化调节。器件选型环节需要重点关注专用的高速电流舵架构 DAC, 典型代表包括 MAX5875 和 LTC2000 系列产品, 这类器件基于分段式电流源设计, 具备将建立时间控制在 15ns 以内的卓越能力。参数配置过程中, 输出电流范围通常设置为  $\pm 20$ mA 较为合理, 依靠外部基准电阻实现精确调控, 基准电阻的选择必须充分考虑温度漂移特性和长期稳定性要求, 建议采用精密金属膜电阻确保转换准确度。负载网络设计直接关系到电流 – 电压转换的效率和线性度指标, 工程实践中多采用中心抽头变压器或平衡 – 不平衡转换器等成熟拓扑, 既能满足阻抗变换需求, 又能有效保持差分信号的完整性。

对于直接电阻负载方案, 需要精心设计阻值分配, 主负载电阻选择 25 $\Omega$  以获得合适的转换增益, 并联终端电阻设置为 200 $\Omega$  以改善频率响应平坦度, 这种配置下的综合阻抗约为 20 $\Omega$ , 既保证了足够的信号幅度又维持了良好的高频特性。驱动能力增强和信号完整性保障需要通过合理的前级处理电路来实现, 缓冲放大器的选择要兼顾速度和驱动能力, AD8001 等电流反馈型运放具有优异的瞬态响应, 其 2000V/ $\mu$ s 压摆率能够应对快速电流变化。电路连接采用 AC 耦合方式可以消除直流偏置的影响, 耦合电容选择高质量的 NPO 材质, 容值设定为 0.1 $\mu$ F 以确保低频响应延伸。多通道应用中, 各路电流输出需要独立的偏置调整, 通过数字电位器实现自动校准, 补偿工艺偏差和温度变化带来的不一致性, 确保系统整体的时延匹配精度。

### （三）高速同步控制电路

多通道测量系统中, 高速同步控制电路承担着时序协调的重任, 其性能表现往往决定了整套系统能否达到预期的测量精度和运行稳定性。从工程实施角度看, 同步控制的成功实现主要依赖两个关键要素: 统一时钟分配网络的构建以及触发时序的精密管理。在时钟分配架构中, 推荐使用 CDCLVD110 等专业时钟缓冲芯片, 通过扇出缓冲技术形成一主多从的树状分布, 这样能够保证各个通道都能接收到频率和相位完全一致的时钟基准。PCB 布线环节对时钟质量的影响不容小觑, 各条时钟分支的走线长度必须严格匹配, 偏

差控制在  $\pm 0.5\text{mm}$  范围内才能将时延差异限制在  $\pm 3\text{ps}$  左右，这通常需要借助蛇形走线或专门的延时补偿线路来实现。时钟源的品质直接关系到系统的长期稳定性，在时钟发生器附近配置低相位噪声的晶体振荡器是必要措施，特别是温度补偿型 TCXO 能够将频率稳定度指标提升到  $\pm 0.1\text{ppm}$  水平，为高精度同步奠定坚实基础。

触发同步机制的实现需要结合硬件和软件两个层面，硬件触发采用专用触发信号线，通过差分 LVDS 电平传输确保信号完整性，触发延时控制在  $10\text{ns}$  以内。软件触发通过高速串行接口如 SPI 或并行总线实现，需要预先计算并补偿通信延时。多通道数据同步采用握手协议，各通道在完成数据准备后发送就绪信号，主控制器收集所有就绪信号后统一发送开始命令。这种机制虽然增加了少量延时，但确保了绝对的同步性。对于精度要求极高的应用，可采用硬件时间戳技术，在每个数据包中嵌入高精度时钟计数值，后续通过软件算法进行时间对齐校正。

#### （四）PCB 布局布线优化

PCB 的物理实现质量往往成为制约高速同步测量系统性能发挥的隐性瓶颈，合理的布局布线策略能够最大程度地挖掘电路设计的潜在性能。布局规划的首要原则是信号流向的顺序性，将输入、处理、输出功能模块按照信号传递方向依次排列，避免信号回流和交叉干扰。关键器件的放置需要考虑热管理和电磁兼容性，大功率器件如开关电源 IC 应放置在 PCB 边缘便于散热，同时远离敏感的模拟电路区域。去耦电容的布局采用就近原则，每个有源器件的电源引脚附近放置适当容值的陶瓷电容，大容量电解电容用于低频去耦，小容量贴片电容负责高频滤波。布线策略中，差分信号对必须保持严格的几何对称性，走线宽度、间距和长度都要精确匹配，过孔使用应尽量减少以降低不连续性影响。阻抗控制通过叠层设计实现，标准的 4 层板结构中，信号层与参考地层的介质厚度决定了特征阻抗，需要与 PCB 厂商密切配合进行阻抗仿真验证。高速信号走线应避免开关电源和时钟信号的辐射区域，必要时采用地平线分割技术进行隔离。接地设计采用多点接地与单点接地相结合的策略，高频信号采用多点接地减少回流路径阻抗，低频和直流信号采用单点接地避免地环路干扰<sup>[3]</sup>。

## 四、测试与验证方法

高速同步测量模块 DA 电路的性能验证必须构建系统性的测试框架，采用多层次测量策略来全面考核系统的时延性能和同步准确度。

#### （一）时延测量与分析

时延特性的准确测定是检验低时延设计成效的关键步骤，这个过程离不开高精度时域测试仪器和规范的测试流程。在基本测试环节，选用 Keysight DSOX6004A 等高速示波器搭配差分探头来捕获 DA 输出的建立过程，借助阶跃信号激励来评估从数字码值切换到模拟量稳定的完整耗时。信号激励必须涵盖整个动态范围，尤其要重点观察大幅跳变情况下的瞬态行为。想要进一步提

升测量精度的话，时间间隔分析仪 Keysight 53230A 是个不错的选择，其皮秒级分辨能力足以捕捉细微的时延变化。测试环境的温度管控相当重要，毕竟器件的传输延迟对温度变化比较敏感，标准做法是将测试温度稳定在  $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$  范围内。针对多通道架构的时延一致性检测，需要对所有通道实施同步激励，通过相位差分析来判断各通道间的同步水平，相位测量精度需要达到  $\pm 0.1^{\circ}$  才能满足高精度同步的苛刻要求。

#### （二）频域特性验证

频域测试手段能够深入揭示 DA 电路的动态行为和频率传输特征，为带宽评估和群延时分析提供关键数据支撑。借助 Rohde&Schwarz ZVA24 等矢量网络分析仪对 DA 电路实施 S 参数扫描，着重分析传输参数 S21 的幅频和相频响应，群延时指标通过相频曲线的微分运算得出，优秀的低时延系统在工作频段内应该展现出相对平坦的群延时曲线。频率扫描的覆盖范围要从直流一直延伸到系统工作带宽 10 倍频率处，这样才能充分暴露高频寄生效应的影响。失真特性测试借助 Audio Precision APx555 音频分析仪完成，通过纯音激励来测定总谐波失真 THD 和信噪比 SNR 等线性度指标。互调失真的评估采用双音测试信号，重点观察三阶交调分量的大小，这对系统动态范围的评价很有参考价值。

#### （三）系统级同步性能评估

系统级验证是检验整体设计目标达成情况的最终考核，必须在真实工作环境下对多通道同步测量的准确性和可靠性进行综合评价。测试平台的搭建包括激励源、待测 DA 模块、数据采集装置和分析软件等完整链路，构成闭环验证系统。同步精度检测通过输出预设相位关系的测试信号，利用高精度数字示波器测量各通道输出的相位偏差，对相位差的统计特征进行分析，包括均值、方差和极值范围等，以此评判系统的同步一致性水平。长期稳定性考核需要在 24 小时以上的持续运行中跟踪重要参数的演变趋势，涵盖输出幅值、相位稳定性和温漂特性等方面。环境适应性验证涉及温度冲击、湿度变化和电磁骚扰等多种应力条件，检验系统在严苛环境下的性能保持程度。最终需要将系统实测性能与设计目标进行详细对比，编制完整的性能评估报告，为后续优化改进和工程推广应用奠定坚实基础。

## 五、结束语

总的来说，高速同步测量模块 DA 电压电流电路的低时延设计本质上是一个多维度交叉的技术挑战，需要从器件筛选、拓扑架构、系统集成以及制造工艺等各个环节进行统筹考虑。当前，伴随着高速数字处理技术的快速演进和先进封装技术的日趋成熟，DA 转换电路在时延性能方面仍存在可观的提升潜力。未来，新一代 DA 芯片技术、智能化时钟同步算法以及更为精准的延时校正机制将成为重点关注方向，这些技术突破对于应对愈发严格的高速同步测量要求具有重要意义。

## 参考文献

- [1] 陈永，詹芝贤，张薇. 基于 ARIMA-TCN 混合模型的高速铁路时间同步方法 [J]. 铁道学报, 2024, 46(06): 90-100.
- [2] 廖勇，罗渝，荆亚昊. 6G 新型时延多普勒通信范式：OTFS 的技术优势、设计挑战、应用与前景 [J]. 电子与信息学报, 2024, 46(05): 1827-1842.
- [3] 罗如意，代永涛，吕学磊，贺崇文，卢沙，欧阳诗杰. 智慧高速多源异构感知数据实时高精度融合算法 [J]. 中国交通信息化, 2024, (04): 86-89.

# 5G+ 智能电网背景下电力通信网络切片技术 优化与可靠性提升策略

李玉娇

国网冀北电力有限公司张家口供电公司, 河北 张家口 075000

DOI:10.61369/EPTSM.2025040007

**摘 要 :** 网络切片技术是5G的关键技术之一,它通过将物理网络划分为多个虚拟的、相互隔离的逻辑子网络,每个子网络根据不同的业务需求定制相应的网络资源和服务质量(QoS),从而满足多样化的业务场景需求。本文以“5G+ 智慧电网”为研究对象,对其分层优化方法和可靠性增强策略进行研究。在对5G技术特征和智能电网服务需求进行深入研究的基础上,阐明了网络切片的优点和存在的问题。希望本文研究成果将为构建高效、稳定、安全的电力通信网络提供理论依据和技术支撑,促进智能电网的高质量发展。

**关 键 词 :** 5G; 智能电网; 网络切片; 技术优化; 可靠性提升

## 5G Smart Grid Background Power Communication Network Slicing Technology Optimization and Reliability Enhancement Strategy

Li Yujiao

State Grid Ji Bei Electric Power Co., Ltd. Zhang Jia Kou Power Supply Company, Zhangjiakou, Hebei 075000

**Abstract :** Network slicing technology is one of the key technologies of 5G. It can meet the needs of diversified business scenarios by dividing the physical network into multiple virtual and mutually isolated subnets, and each subnet customizes the corresponding network resources and service quality (QoS) according to different business needs. This paper takes “5G Smart Grid” the research object and studies its hierarchical optimization method and reliability enhancement strategy. On the basis of in-depth research on the technical characteristics of 5G and the service needs of smart, the advantages and existing problems of network slicing are clarified. It is hoped that the research results of this paper will provide theoretical basis and technical support for the construction of efficient, and secure power communication network, and promote the high-quality development of smart grid.

**Keywords :** 5G; smart grid; network slicing; technology optimization; rel enhancement

### 引言

在世界能源结构变革和信息化快速发展的背景下,智能电网已经成为电力工业的一个重要发展趋势。智能电网是一种集传感、通信、信息等为一体的新型智能电网,它能够有效提高供电可靠性、高效性和安全性。而5G以其高传输速率、低延迟、大容量、高可靠等优点,成为未来智能电网建设的重要支撑。在智能电网中,不同的业务对通信网络的要求差异显著,如电力系统的实时控制业务需要极低的时延和极高的可靠性,电力计量、信息发布等业务则对带宽和数据传输速率有较高要求。本文以5G+ 智能电网为背景,开展面向5G+ 智能电网的电力通信网络切片优化及可靠性增强方法研究。通过对电力通信网络切片的应用现状及面临的问题进行深入剖析,并提出有针对性的优化及可靠性增强策略,从而促进5G与智能电网的深度融合。

### 一、5G 与智能电网及网络切片技术概述

#### (一) 5G 技术特点与优势

5G 技术相较于前几代移动通信技术,有着明显的特色与优点。首先,5G 的数据传输速度非常快,理论上可以达到20Gbps以上,可以满足高清视频监控和大数据分析等海量数据的高速传输。其次,5G 网络的端到端时延可以达到1ms以下,这对时延要

求较高的实时控制服务(如继电保护、自动控制等)具有重要意义。另外,5G 具备高可靠、网络切片等特点,采用网络切片技术可以对多个业务进行分区,并对其进行个性化服务,从而提升网络资源利用率,并且提升服务品质。

#### (二) 智能电网对通信网络的需求

智能电网涵盖发电、输电、变电、配电、用电等多个环节,服务种类多并且应用场景多,对通信网络的质量要求也高。在发电

作者简介:李玉娇(1992.06-),女,汉族,河北唐山人,学历:硕士研究生,职称:电力工程师,研究方向:电力通信技术。



端，要对风电、光伏等新能源发电进行实时传输，才能对其进行精确控制；在输变电过程中，继电保护、遥控等实时控制服务对延迟和可靠度提出了更高的要求，以保证电网的稳定运行。而在配电网中，必须对配电网进行实时监控与故障诊断，这就对通信网提出高带宽、高可靠性的需求；在用电环节，大量智能电表、智能家居设备的接入，需要通信网络支持海量设备的连接和数据交互<sup>[1]</sup>。

### （三）网络切片技术原理与应用价值

网络切片（Networkslice）是一种以虚拟化为基础的网络体系结构，其核心思想是将物理网的资源虚拟化，并针对不同的服务需要，灵活地对虚拟化的资源进行配置与组合，构造多个独立的虚拟网络切片。各片网络能够对带宽、时延、可靠性等进行独立的配置，从而满足不同业务对服务质量的需求。

网络切片是智能电网发展的必然趋势。该方案能有效地将各业务分离开来，防止各业务间的互相干扰，从而增强网络的稳定与可靠。比如通过对实时控制服务与非实时服务进行分区，实现对服务质量的高质量保证，从而保证电网安全、稳定地运行。另外，网络切片还可以根据业务的具体要求，对资源进行动态配置，从而有效地减少资源的浪费。

## 二、5G+ 智能电网背景下电力通信网络切片技术应用现状与问题

### （一）应用现状

当前，将5G网络切片技术用于智能电网已经取得了一些成果，在部分试验项目中，已经成功地实现了对电网实时监控、电能计量、用电信息收集等多种业务场景的网络切片。比如在实时控制服务领域，通过构造专用的高可靠低延迟切片，为继电保护、自动控制等服务提供可靠的通讯支持，从而提高电网的控制精度与响应速率。在电能计量及用电信息收集服务中，通过对海量智能仪表及收集装置的网络资源进行合理配置，以达到有效的数据传输与精确收集。

与此同时，各大电力公司也在积极地与电信运营商进行合作，共同探讨5G网络切片在智能电网建设中的更多应用场景与商业模式。多地已成立5G+智能电网协同创新实验室，开展基于网络切片的智能电网关键技术及应用研究，促进5G与智能电网深度融合。

### （二）存在的问题

#### 1. 切片资源分配不合理

在实践中，由于缺乏对智能电网服务特征及需求的精确分析，造成网络切片资源配置的不合理。一方面，有些切片对资源进行了过度的配置，导致大量的资源浪费；另一方面，某些服务切片对服务质量有很高的要求，会因为资源的匮乏而导致服务质量下降，从而影响到服务的正常运作。而由于智能电网服务的业务与需求呈现出动态性，使得传统的静态资源配置方法很难自适应服务的动态性，从而降低了网络资源的利用率。

#### 2. 网络管理复杂

5G功率通信网络切片具有多层、多域的特点，包含切片创建、配置、监测与优化等多个环节，具有很高的管理复杂性。当前，由于缺乏统一高效的网络切片管理体系与平台，各切片间的

协作管理难度较大，很难实现整体优化与柔性调度。与此同时，在切片过程中，由于切片失效，无法对其进行快速的定位与修复，从而降低了网络的可靠性与QoS。

#### 3. 安全风险较高

网络切片为企业提供了灵活高效的服务，但也带来了新的安全隐患，当多片片共享物理网络资源时，如果片层间的隔离机制不够完美，就会出现安全漏洞，将一个片层的安全性问题向其它片层传播，从而威胁到整个网络的安全<sup>[2]</sup>。另外，智能电网的电力通讯网络关系到国家的能源安全与社会稳定，对其信息系统的安全性提出了更高的要求，但目前的网络切片安全防护技术与手段尚不完善，很难有效应对日趋复杂的网络安全威胁。

#### 4. 技术标准不完善

目前，5G网络切片技术在电力通信领域的应用缺乏统一的技术标准和规范，由于各企业、各机构在设计、实施及管理上的差异，造成各切片间的兼容性与可操作性不强，阻碍了其在智能电网中的广泛应用。另一方面，由于技术标准的不完备，使得网络的构建与运行变得更加困难。

## 三、5G+ 智能电网背景下电力通信网络切片技术优化策略

### （一）切片资源动态分配优化

#### 1. 业务需求精准分析

切片资源需要构建智能电网服务需求分析模型，利用大数据分析对智能电网各服务的业务特性、服务质量要求、时序特征等进行深度分析与预测。通过对历史业务数据、实时监测数据及相关外部数据（如气象、用电习惯等）的采集与分析，精确把握业务的动态变化规律与需求趋势。比如在电力负荷预测方面，可以采用机器学习的方法，结合历史、天气等数据，构建基于机器学习的电力负荷预报模型，实现对各时段内电力负荷的预报，从而为电网调度提供决策依据<sup>[3]</sup>。

#### 2. 动态资源分配算法设计

根据业务需求的分析进行动态的资源配置算法，利用遗传算法、粒子群等智能优化算法，并与软件定义网络（SDN）技术相结合，对网络切片进行动态调整与优化配置。在此基础上，结合实际业务的实际需要，对切片的带宽、延迟、可靠性等参数进行动态调整，以保证资源的合理、高效地配置。

#### 3. 资源共享与协同机制构建

建立切片资源共享与协同机制，提高资源的利用效率，在不影响业务QoS的前提下，允许部分切片之间共享闲置资源，实现资源的灵活调配。同时加强不同切片之间的协同工作，通过协同管理平台实现切片资源的统一调度和优化配置。例如，在用电低谷期，可将电力计量切片的部分闲置带宽资源临时分配给电力信息发布切片，提高资源利用率。

### （二）切片管理架构优化

#### 1. 分层分级管理架构设计

构建分层分级的网络切片管理架构，将网络片管理划分为全局

管理层、分区管理层和切片实例层三个层次。其中公司整体管理部门主要负责公司的总体规划、战略规划及资源调配；分区管理部门按照公司整体管理战略，管理并监测其所在区域的业务范围；切片执行器层主要负责特定切片的建立、配置与运行。由此采用层次的管理方式，对网络切片进行精细管理，增强管理的有效性和柔性<sup>[4]</sup>。

### 2. 智能化管理平台建设

利用人工智能、大数据等技术，构建智能网络切片管理平台，该系统具有智能决策、自动组态、实时监测以及故障预报等功能。由此基于网络切片的在线诊断方法，并对其进行在线检测和诊断，同时，该系统还可以基于业务需求与网络状况，对切片结构与资源分配策略进行自适应调整，从而达到智能维护与维护的目的。

### 3. 跨切片协同管理机制建立

建立跨切片协同管理机制，提高各层间的协作与信息共享能力，基于多层网络的通用接口规范与协议。比如在切片失效时，协作管理机制可以将切片上的服务转移到其它的备份切片上，并告知相关切片如何调整资源，以保证服务的持续与稳定。

## （三）安全防护体系优化

### 1. 强化切片隔离技术

采用先进的切片隔离技术，基于虚拟化的隔离技术和网络功能虚拟化（NFV）隔离技术，以强化切片间的隔离效应，采用严格的存取控制与资源隔离机制，保证各层间的安全隔离，避免各层间的安全隐患传播。同时通过对切片过程中的数据流进行实时监控与分析，及时发现并拦截异常数据流，从而保证切片的安全性。

### 2. 构建端到端安全防护机制

建立端到端的安全防护机制，覆盖从使用者终端机到核心网的全部通讯连接，在用户终端方面，通过身份认证和数据加密来保证数据的安全性。采用 VPN、SSL/TLS 等加密技术，保证网络的安全可靠，而在核心网方面，强化防火墙、入侵检测系统、入侵防御系统（IPS）等网络安全保护装置的配置与管理，以抵御外来的攻击与来自内部的安全威胁。

### 3. 加强安全风险评估与应急响应

定期对网络切片的安全风险进行评估，找出可能存在的安全隐患及危险部位，并建立相应的对策。同时建立健全的安全事故应急响应机制，使事故的危害最小化，在此基础上，还应加强对员工的安全知识及紧急情况的处理。

## 四、5G+ 智能电网背景下电力通信网络可靠性提升策略

### （一）引入边缘计算技术

将边缘计算技术与网络切片技术相结合，将边缘计算节点部

署在接近用户端或电源装置端。边缘计算节点能够对局部数据进行实时处理与分析，降低向核心网传送数据时延与带宽的负荷，提升服务的响应速率与可靠性。比如在配电网侧，通过在配变附近布设边缘计算节点，实时监控与分析配电网的运行状况，一旦发现异常，可在当地即时诊断与处置，并将重要信息上传至核心网，以达到快速隔离与恢复的目的。

### （二）应用人工智能技术

利用人工智能技术，采用机器学习、深度学习等方法，通过对电网切片运行数据的分析与处理，达到对电网运行状态的智能化监控与预警。由此基于多层网络结构的多层网络拓扑优化方法，比如通过对电网业务数据的挖掘，发现电网中的异常业务，并对可能出现的拥堵、失效等情况进行预测，从而实现对电网资源的合理配置与疏导<sup>[5]</sup>。

### （三）构建冗余备份机制

为提高网络切片的可靠性，建立多余的备份机构，在体系结构的设计上，通过使用冗余器件、冗余链路、冗余切片等手段，保证当某一设备或某一链路发生故障时，整个网络仍然可以正常工作。比如对重要服务片进行备份，在主片失效后可以迅速切换到备份，从而保证服务的连续性。

### （四）完善技术标准与规范

加快制定和完善 5G 网络切片技术在电力通信领域的技术标准 and 规范，相关部门和行业组织应联合电力企业、通信运营商、科研机构等，共同研究和制定网络切片的设计、实现、管理、安全等方面的标准，确保不同企业和机构的网络切片产品和系统具有良好的兼容性和互操作性。由此为 5G 网络切片技术在智能电网中的规模化应用奠定基础，减少网络构建、运行维护费用，提升系统可靠性与稳定性。通过对 5G 功率通信技术的深入研究，提高我国 5G 功率通信技术在世界上的话语权与竞争能力。

## 五、结论

网络切片技术是我国“5G+ 智能电网”深度融合发展中迫切需要解决的关键科学问题，但是目前电网切片技术仍然存在着资源配置不合理、网络管理复杂、安全风险高、技术标准不健全等问题，严重制约着电网的可靠性与 QoS。本文通过开展动态切片资源配置优化、切片管理结构优化、安全防护体系优化等技术优化，并结合边缘计算、人工智能技术、冗余备份机制构建、技术标准规范等手段，有效地解决现有技术难题，提高电网切片技术的性能与可靠性。未来，在 5G 技术与智能电网的快速发展下，需要对新技术与新需求进行持续关注，并对其进行深入的研究与应用，促进其向更高效率、更稳定、更安全的方向发展。

## 参考文献

- [1] 王志伟, 张立杨, 王志鹏, 等. 配电网无线与电力线融合通信覆盖优化技术 [J]. 电波科学学报, 2025, 40(02): 301–312. DOI: 10.12265/j.cjors.2024086.
- [2] 侯文鹏. 5G 通信系统中的网络切片技术及实施策略研究 [J]. 消费电子, 2025, (05): 242–244.
- [3] 阚拓, 赵天剑, 马琳娜, 等. 5G 网络切片技术在电力通信中的研究与应用 [J]. 电工技术, 2023, (13): 214–217. DOI: 10.19768/j.cnki.dgjs.2023.13.058.
- [4] 冯妍妍, 陈若男, 刘妍, 等. 电力通信网络的可靠性分析与优化设计 [J]. 智能城市应用, 2025, 8(02): 41–43. DOI: 10.33142/sca.v8i2.15437.
- [5] 蒲媛媛, 解鹏, 罗凯, 等. 电力通信中确定性网络流量调度机制的优化与延时性能评估 [J]. 中国高新科技, 2025, (01): 29–31. DOI: 10.13535/j.cnki.10-1507/n.2025.01.07.

# 分布式光伏对低压台区电压分布的影响及优化措施

崔磊

国网冀北电力有限公司唐山供电公司, 河北 唐山 063000

DOI:10.61369/EPTSM.2025040008

**摘要：**本文系统探讨分布式光伏接入低压台区对电压分布的影响及优化措施。分析影响机理，阐述电压越限、波动加剧等负面影响，提出无功补偿、智能控制等优化策略，评估措施实施效果并展望，为提升低压台区电压质量提供参考。

**关键词：**分布式光伏；低压台区；电压分布；影响机理；优化措施

## Impact and Optimization Measures of Distributed Photovoltaic on Voltage Distribution in Low Voltage Distribution Network

Cui Lei

Tangshan Power Supply Company, State Grid Ji Bei Electric Power Co., Ltd., Tangshan, Hebei 063000

**Abstract：** This paper systematically explores the impact of distributed photovoltaic (PV) access on low voltage distribution network and optimization measures. The impact mechanism is analyzed, the negative such as voltage exceedance and fluctuation aggravation are expounded, and optimization strategies such as reactive power compensation and intelligent control are proposed. The implementation effect of the measures is evaluated prospected, which provides a reference for improving the voltage quality of the low voltage distribution network.

**Keywords：** distributed photovoltaic; low voltage distribution network; voltage distribution; impact mechanism; optimization measures

## 引言

全球能源转型推进，分布式光伏因清洁、灵活在低压台区广泛应用。但分布式光伏接入改变传统低压台区潮流方向和功率分布，对电压分布产生复杂影响。深入研究其影响机理，探索有效优化措施，对保障低压台区电网安全稳定运行、提升供电质量意义重大。

## 一、分布式光伏接入低压台区的电压分布影响机理

### （一）电压分布的基本原理

传统低压台区电网中，电能从高压侧经变压器降压后，通过配电线路输送到用户端。依据欧姆定律，线路电流在线路电阻和电抗产生电压降，致使各节点电压有差异。通常，离电源点越远，电压损耗越大，电压越低。负荷稳定且潮流方向固定时，电压分布特性相对稳定，遵循规律，可通过潮流计算等方法准确分析预测。

### （二）分布式光伏接入后的电压变化

分布式光伏接入低压台区改变原有电网功率流向。光照充足时，分布式光伏向电网注入功率，使潮流方向改变。这种功率注入导致线路电流方向和大小变化，进而引起电压分布改变。比如，光伏接入点附近因功率注入电压升高；距光伏接入点远且负荷大的区域，可能因潮流变化电压降低。这种电压变化与光伏输出功率、电网拓扑结构、负荷特性等因素密切相关<sup>[1]</sup>。

### （三）影响电压分布的主要因素

影响分布式光伏接入后低压台区电压分布的因素多。首先是

分布式光伏装机容量和出力特性，装机容量大、出力高，对电压抬升作用明显；其次，电网线路参数，如线路长度、导线截面等，直接影响线路电阻和电抗，进而影响电压损耗；负荷大小和分布也是关键，负荷变化改变潮流分布，与光伏出力相互作用影响电压分布；此外，变压器变比、分接头位置及无功补偿装置配置等，也对电压分布有重要影响。

### （四）电压偏差与波动的表现

分布式光伏接入后，电压偏差和波动问题突出。电压偏差是实际电压与额定电压偏离程度，可能出现过电压或欠电压。光伏出力大且负荷轻时易出现过电压；光伏出力不足或负荷高峰时可能导致欠电压。电压波动是电压短时间快速变化，主要由光伏出力随机性和间歇性引起，如云层遮挡使光伏输出功率瞬间变化，引起接入点附近电压波动，影响用户用电设备正常运行。

### （五）电压质量评估体系

为准确评估分布式光伏接入后低压台区电压质量，建立完善评估体系。该体系包含电压偏差、电压波动与闪变、三相电压不平衡度等多个指标。电压偏差以实际电压与额定电压差值百分比衡量；



电压波动通过监测电压幅值变化幅度和频率评估；三相电压不平衡度反映三相电压差异程度。通过监测分析这些指标，可全面了解低压台区电压质量状况，为后续优化措施提供数据支持<sup>[2]</sup>。

## 二、分布式光伏对低压台区电压分布的负面影响

### （一）电压越限问题

分布式光伏接入后，电压越限是常见问题。白天光伏大发时段，大量功率注入电网，尤其在末端线路，因线路电阻和电抗，电压明显升高，可能超过规定电压上限。长期电压越限会加速用电设备绝缘老化，缩短设备寿命，甚至引发设备故障，影响用户正常用电安全。同时，过高电压可能损害电网保护装置和计量设备，影响电网可靠运行。

### （二）电压波动加剧

因光伏出力受光照强度、天气等因素影响，具有随机性和间歇性，导致电压波动加剧。频繁电压波动对一些电压敏感用电设备，如精密仪器、电子设备等产生不良影响，使其工作性能下降甚至故障。此外，电压波动还可能引起灯光闪烁，影响用户视觉感受和生活质量。对一些工业用户，电压波动可能导致产品质量不稳定，增加生产损耗，降低生产效率<sup>[3]</sup>。

### （三）电压不平衡

在三相四线制的低压台区电网中，如果分布式光伏接入配置不合理，很容易引发三相电压不平衡问题。部分用户安装的分布式光伏系统可能只接入某一相，使得该相的功率注入大幅增加，而其他两相的负荷却相对不变。这种不平衡的功率注入会导致三相电流不平衡，进而引发三相电压不平衡。例如，当某一相接入大量分布式光伏时，该相电流可能是其他两相的数倍，造成三相电压偏差过大。电压不平衡不仅会增加线路和变压器的损耗，降低设备的运行效率，还会使电动机等三相设备出现过热现象，加速设备老化，缩短设备使用寿命，严重时甚至可能引发设备故障，影响整个电网的安全稳定运行。

### （四）对保护装置的影响

分布式光伏的接入会显著改变电网短路电流的大小和方向，对原有的保护装置产生诸多不利影响。其一，当电网发生线路故障时，光伏电源的反送电会使短路电流的大小和方向发生变化，导致保护装置无法准确判断故障情况，进而出现误动作，比如不必要的跳闸，影响非故障区域的正常供电。其二，光伏电源的存在可能降低保护装置的灵敏度，使其无法及时检测到故障电流，从而不能迅速切除故障，导致故障范围不断扩大，严重威胁电网的安全运行。这不仅增加了电网故障修复的难度和时间，还可能引发更严重的连锁反应，造成大面积停电事故<sup>[4]</sup>。

### （五）对电网规划与运行的挑战

分布式光伏的大量接入给电网规划与运行带来了全新的挑战。在电网规划方面，因为分布式光伏的装机容量和发电出力具有很强的不确定性，难以准确预测其对电网的具体影响，所以传统的电网规划模式不再适用。规划人员需要考虑更多的不确定因素，如光伏的安装位置、容量变化、出力特性等，以提高电网规

划的灵活性和适应性。在电网运行方面，为了维持电压稳定和电网可靠运行，需要对分布式光伏的出力进行实时监测和精确控制，并协调其与负荷之间的关系。这对电网运行管理人员的技术水平和管理能力提出了更高的要求，需要采用先进的监测设备和智能控制系统，以实现电网的精细化管理。

## 三、分布式光伏接入低压台区的电压优化措施

### （一）无功补偿优化

无功补偿是改善低压台区电压质量的有效手段。在分布式光伏接入的低压台区，合理配置无功补偿装置，像并联电容器、静止无功发生器（SVG）等，能够根据光伏出力和负荷的实时变化，动态调整无功功率补偿量。当光伏出力较大，导致电压升高时，无功补偿装置可以吸收多余的无功功率，进而降低电压；当负荷增大，引起电压降低时，无功补偿装置则发出无功功率，提升电压<sup>[5]</sup>。另外，采用分组投切的方式，可根据实际运行情况灵活调整补偿容量，既能满足不同工况下的电压调节需求，又能提高无功补偿的经济性和效果。通过合理的无功补偿优化，能够有效缓解分布式光伏接入带来的电压波动问题，提升电网的电压稳定性。

### （二）有载调压技术

有载调压变压器可以在不停电的情况下，通过调节分接头位置改变变压器变比，进而调整输出电压。在分布式光伏接入的低压台区安装有载调压变压器，可依据实时监测到的电压变化，自动调节分接头，将电压严格控制在合理范围之内。通过对各节点电压进行实时监测，并结合光伏出力和负荷的动态变化，制定科学合理的调压策略，能够实现对电压的动态调节。例如，当检测到某节点电压过高时，有载调压变压器自动调整分接头，降低输出电压；相反，当电压过低时，则升高输出电压。这种方式能够有效解决电压越限问题，显著提高低压台区的电压质量，保障电网的稳定运行<sup>[6]</sup>。

### （三）智能控制策略

借助先进的智能控制技术，包括先进的监测系统、自动化控制装置和智能算法，能够实现分布式光伏与电网的协同控制。通过实时监测光伏出力、负荷、电压等关键参数，并运用智能算法对这些数据进行分析 and 预测，可制定出最优的控制策略。一旦检测到电压越限，智能控制系统能够迅速自动调整光伏的有功和无功出力，或者控制无功补偿装置和有载调压变压器动作，从而维持电压稳定。另外，智能控制策略还可以实现多台分布式光伏之间的协调运行，使它们在不同的工况下相互配合，共同应对电网的变化，提高电网的整体稳定性和可靠性，为用户提供更加优质、稳定的电力供应。

### （四）电网结构优化

合理优化电网结构是解决分布式光伏接入后电压问题的重要途径。通过增加配电线路的联络开关，能够显著提高电网的灵活性和供电可靠性。当某条线路出现电压问题时，可通过联络开关调整潮流分布，将负荷转移到其他线路，从而改善电压状况。同时，适当缩短线路长度、增大导线截面，能够有效降低线路的电

阻和电抗，减少功率传输过程中的电压损耗。此外，优化变压器的布局和选型，合理配置变压器容量，提高变压器的运行效率，也有助于改善电压分布。比如，在负荷集中区域合理增设变压器，避免因供电半径过长导致电压下降。通过这些电网结构优化措施，能够从根本上提升电网的承载能力和电压调节能力，适应分布式光伏接入后的运行需求<sup>[7]</sup>。

（五）政策与技术标准

制定完善的相关政策与技术标准，是规范和引导分布式光伏合理接入与稳定运行的关键。在政策层面，政府应出台鼓励支持分布式光伏合理接入的政策，明确规定电压质量要求以及各参与主体的责任和义务，为分布式光伏的健康发展提供政策保障。在技术标准方面，需制定严格的分布式光伏接入技术规范，涵盖接入容量限制、功率因数要求、电压调节能力等多个方面，确保分布式光伏接入后不会对电网电压质量造成严重影响。通过政策引导和技术标准约束，能够促进分布式光伏与低压台区电网的协调发展，实现经济效益和社会效益的双赢，推动分布式光伏产业的可持续发展。

四、优化措施的实施效果评估与展望

（一）评估指标体系

科学合理的评估指标体系是衡量优化措施成效的核心工具。在电压质量指标中，电压合格率是统计周期内电压处于国标允许偏差范围的时长占比，能直观反映供电稳定性；电压偏差平均值通过计算实际电压与额定电压的差值，可揭示偏离程度；电压波动幅度用于衡量电压短时间的变化范围；三相电压不平衡度则分析三相幅值或相位的差异。在电网运行指标方面，电网损耗降低率通过对比优化前后的线损电量，体现传输效率的提升；设备故障率下降率反映设备运行稳定性的改善。通过前后数据的纵向对比与行业标准的横向参照，能够系统量化评估优化效果<sup>[8]</sup>。

（二）实施效果分析

实际应用中，上述优化措施取得一定效果。如无功补偿优化有效降低电压偏差，提高电压合格率；有载调压技术快速响应电压变化，将电压稳定在合理范围；智能控制策略实现分布式光伏和电网精细化管理，提升电网稳定性和可靠性；电网结构优化减少电压损耗，改善电压分布；政策与技术标准实施规范分布式光伏接入和运行，保障电网安全稳定。但不同地区和电网结构下，

优化措施实施效果有差异，需根据实际情况调整优化。

（三）技术挑战与未来方向

现有优化措施在推广过程中面临技术瓶颈。在复杂的配电网环境下，智能控制算法受谐波、通信延迟影响，指令滞后率达到15%，影响调节的精准性。无功补偿装置单台成本为5-10万元，有载调压变压器成本更高，达20-50万元，这制约了企业的投入。光伏出力受天气影响较大，当前预测误差率在15%-25%，导致功率控制困难。未来需要研发自适应算法，利用边缘计算缩短响应时间；通过新材料和规模化生产降低设备成本；结合气象大数据与深度学习，将预测误差率控制在10%以内<sup>[9]</sup>。

（四）跨学科融合趋势

解决低压台区电压问题需要跨学科协同创新。电力电子技术与计算机技术结合，可以开发出微秒级响应的智能调压设备；通信技术与物联网技术协同，能够构建秒级数据采集的监测网络。大数据和人工智能通过挖掘历史数据，能够提前72小时预测电压异常，准确率超过90%。某地区搭建智能调控平台，整合光伏、储能与配电数据，实现全网智能决策，使电网运行效率提升25%。跨学科融合正成为提升电网智能化管理的关键路径。

（五）全球经验借鉴

国际上在分布式光伏与电网融合方面成果丰富。德国建立全链条政策体系，强制光伏实现低电压穿越，故障时光伏脱网率降至3%以下。美国借助微电网和需求侧响应，部分区域分布式能源自给率达到40%。日本通过“电力池”平台实现余电高效交易。我国电网规模大、地域差异明显，可以借鉴德国完善技术规范，学习美国提升系统灵活性，参考日本优化市场机制，进而制定符合国情的发展策略，推动电网清洁智能转型<sup>[10]</sup>。

五、结束语

分布式光伏接入低压台区对电压分布产生复杂影响，带来系列问题 and 挑战。深入研究影响机理，采取无功补偿优化、有载调压技术、智能控制策略、电网结构优化及完善政策与技术标准等多种优化措施，可有效改善低压台区电压质量，保障电网安全稳定运行。但随着分布式光伏进一步发展，仍需不断探索创新，应对新出现技术挑战，加强跨学科融合，借鉴全球经验，推动分布式光伏与低压台区电网协调、可持续发展。

参考文献

[1] 郭雷, 郭鹏, 史学杰, 等. 配电低压台区分布式光伏消纳能力评估方法研究 [J]. 电气技术与经济, 2025, (03): 11-13+16.  
[2] 韩周, 单永梅, 程鑫. 低压台区侧分布式光伏监测调控系统设计 [J]. 电力电子技术, 2025, 59(03): 78-82.  
[3] 蔡木良, 吴朝晖, 夏鹏轩, 等. 分布式光伏台区电压越限问题机理分析及治理方法 [J]. 江西电力, 2025, 49(01): 7-12.  
[4] 戚沁雅, 戴奇奇, 刘发胜, 等. 江西省配网侧分布式储能发展需求探讨 [J]. 江西电力, 2025, 49(01): 13-18+27.  
[5] 杨恒, 孟垂攀, 姚芳, 等. 含分布式光伏的低压台区多场景建模仿真与线损分析 [J]. 微型电脑应用, 2025, 41(01): 10-13+19.  
[6] 刘阳, 宗瑾, 陈璨, 等. 考虑分布式光伏逆变器的低压配电台区过电压自动化治理 [J]. 自动化与仪表, 2025, 40(01): 23-27.  
[7] 胡伟强, 胡军伟, 蒋行舟, 等. 分布式光伏对低压台区配电网电压的影响分析 [J]. 光源与照明, 2024, (12): 113-116.  
[8] 赵景涛, 张颖媛, 郑舒, 等. 大规模分布式光伏接入下低压配电网综合治理设备的研究与应用 [J]. 农村电气化, 2024, (12): 1-5.  
[9] 赵翔宇, 朱萍萍. 分布式光伏对用电信息采集系统线损的影响 [J]. 农村电工, 2024, 32(12): 33-34.  
[10] 邵磊, 王智男, 刘宏利, 等. 基于节点聚类的低压台区分布式光伏接入位置研究 [J/OL]. 天津理工大学学报, 1-7[2025-04-24].

# 汽轮机通流部分改造对电厂运行效率提升的影响分析

董赫伦

阜新发电有限责任公司, 辽宁 阜新 123000

DOI:10.61369/EPTSM.2025040011

**摘 要：** 汽轮机通流部分改造是电厂效率提升的关键技术路径。本文深入分析了通流部分改造对电厂运行效率的多维影响。研究表明，精细化设计的通流部分能优化热力循环系统性能，提高热能向机械能转换效率；改善叶片流道结构和密封系统可增强设备变负荷运行灵活性，适应电网调峰需求。文章剖析了电厂在通流部分改造中面临的技术适配性难题、长期可靠性风险及运行维护动态调控困境，提出构建机组特性数据库、强化新材料性能验证及开发智能流场监测系统 etc 系统解决策略。实践证明，科学系统的改造方案显著提升电厂运行效率，降低燃料消耗，创造可观经济效益与环境效益，对推动电力行业绿色低碳转型具有重要意义。

**关 键 词：** 汽轮机；通流改造；电厂运行效率

## Analysis of the Impact of Steam Turbine Flow Section Renovation on Power Plant Operating Efficiency Improvement

Dong Helun

Fuxin Power Generation Co., Ltd., Fuxin, Liaoning 123000

**Abstract：** The transformation of the flow passage of the steam turbine is a key technical path for improving the efficiency of power plants. This article provides an in-depth analysis of the multidimensional impact of the flow section renovation on the operational efficiency of power plants. Research has shown that finely designed flow paths can optimize the performance of thermal cycle systems and improve the efficiency of converting thermal energy into mechanical energy; Improving the blade flow channel structure and sealing system can enhance the flexibility of equipment operation under variable loads and adapt to the peak shaving needs of the power grid. The article analyzes the technical adaptability challenges, long-term reliability risks, and dynamic operation and maintenance control difficulties faced by power plants in the transformation of the flow section. It proposes system solutions such as building a unit characteristic database, strengthening the performance verification of new materials, and developing an intelligent flow field monitoring system. Practice has proven that the scientific and systematic transformation plan significantly improves the operational efficiency of power plants, reduces fuel consumption, creates considerable economic and environmental benefits, and is of great significance for promoting the green and low-carbon transformation of the power industry.

**Keywords：** steam turbine; flow transformation; power plant operational efficiency

## 引言

能源转化效率始终是电力行业永恒的追求。随着全球能源格局转型与环保要求日趋严格，提升现有电厂运行效率已成为电力企业技术创新的重点方向。汽轮机作为火电、核电等传统电厂的核心设备，其性能水平直接关系到电厂整体经济性与环保性。汽轮机通流部分改造作为一种投入适中且效果显著的技术路线，逐渐受到行业广泛关注。现阶段，国内外电力企业积极探索汽轮机通流部分改造技术，涵盖叶片几何优化、流道结构重构、密封系统升级等多个方面。实践证明，精心设计的通流部分改造方案能使机组热效率提升1-5个百分点，这对大型火电机组而言意味着每年可观的燃料节约与碳排放减少。然而，改造工程涉及复杂的热力学原理、材料科学与控制理论，技术难度与风险不容忽视。

## 一、汽轮机通流部分改造对电厂运行效率提升的意义

### （一）提升热力循环效率

汽轮机通流部分改造对热力循环效率提升具有深远意义。热

力循环作为热能与机械能转换的核心环节，其效率水平直接决定电厂整体经济性能。汽轮机通流部分改造实质上是对能量转换过程中关键工质流动路径的优化重构，主要体现在叶片气动外形精细化设计、流道几何结构重塑、间隙控制精度提高等方面。这些

作者简介：董赫伦（1985.08-），男，汉族，辽宁阜新新人，学历：硕士研究生；职称：工程师；从事的研究方向：热能工程。



技术措施从根本上改变了蒸汽在通流部分中的膨胀特性，减少了多级叶片间的能量损失，显著降低了流动损失与漩涡损失。现代三维叶片气动设计理念引入后，叶片反动度分布更为合理，各级焓降分配更加均衡，汽轮机内部效率明显攀升。热力循环效率提升反映在朗肯循环有效利用可用能增加，背压合理降低，排汽品质提高等层面。从热力学第二定律角度分析，改造后系统熵增率降低，有效功率输出增大，燃料单耗下降，实现了能源资源利用率的根本性提高。电力企业因此获得长期稳定的经济收益，同时减轻环境负荷，满足节能减排要求。汽轮机通流部分改造代表电力工程技术精湛集成，在保证供电可靠性基础上实现效率与经济性的完美统一。

## （二）增强变负荷运行灵活性

增强变负荷运行灵活性对于现代电力系统具有深远意义。汽轮机通流部分的改造优化能显著提升设备在负荷波动环境下的适应性与响应速度。当电网负荷呈现波动趋势时，改造后的汽轮机可迅速调整运行参数，实现负荷快速跟踪，减少调峰过程中的能量损耗。通流部分结构的精细化设计能够降低部分负荷工况下的气流紊乱程度，使蒸汽流动更为平稳，叶片受力更加均匀。改善后的流道形态有助于减小二次流损失，在低负荷区域保持较高的内效率。轴向间隙与径向泄漏的控制技术在负荷变化过程中表现出更佳的密封性能，减轻了能量散失。叶片材料与结构的优化强化了设备耐疲劳性能，延长了频繁调峰调频环境下的使用寿命。现代控制系统与改造通流部分的协同作用使汽轮机在更广泛的负荷范围内都能维持较高的运行效率。电厂因此获得更强的负荷调节能力，能够更好地适应电网调度指令，满足电网稳定性要求。汽轮机改造后的低负荷极限下降，为电厂带来了更大的运行裕度，增强了电力企业应对负荷谷值的能力<sup>[1]</sup>。

## 二、电厂运行效率提升中对汽轮机通流部分改造的挑战

### （一）技术适配性难题

技术适配性难题在汽轮机通流部分改造过程中表现为多维度的工程挑战。汽轮机通流系统作为能量转换的核心环节，其结构参数与运行特性存在严格的匹配关系，任何改造措施均需考虑原有系统的设计边界条件。现有汽轮机在长期运行过程中形成的独特磨损状态与性能衰减曲线，使得标准化改造方案难以直接应用，改造团队往往需面对每台设备的独特“个性”进行定制化设计。叶片型面优化与流道几何结构调整涉及复杂的热力学平衡与强度计算，改造后的流场特性变化可能引发级间参数不匹配、动静件间隙异常等工况。材料科学层面的限制同样不容忽视，新型高温合金与原有金属材料在热膨胀系数、抗氧化性能等方面存在差异，焊接界面的冶金相容性成为技术瓶颈。控制系统响应特性的重新标定也极具挑战，改造后的流量特性变化需与调节系统形成协调匹配，否则可能导致控制死区或过度响应。最为关键的是，这些技术适配性难题彼此交织影响，构成非线性的系统工程问题，单一环节的优化可能引发连锁反应，对系统整体性能产生

不可预见的波动。

### （二）长期可靠性风险

汽轮机通流部分改造后的长期可靠性风险表现为多维度的系统性挑战。改造所引入的新材料与原有结构之间的冶金相容性随时间推移可能出现应力集中区，导致疲劳裂纹扩展速率超出设计预期。改造部件在长期热循环工况下，热态膨胀与冷态收缩的反复作用使得接口处易产生微小变形，逐渐积累成为影响整体运行稳定性的隐患。高温蒸汽长年累月的冲刷与腐蚀作用对改造部件的材料耐久性提出更高要求，异种材料界面处极易发生电化学腐蚀。改造引入的新型流道结构可能改变原有气动特性，长期运行中的气体流动状态偏离设计值，引发非稳态流动现象，加剧部件磨损。叶片改型带来的振动特性变化在长期运行中或与机组固有频率发生共振，形成疲劳损伤累积。汽轮机负荷变化时，改造部件的热应力分布与原设计存在差异，在反复启停过程中容易形成结构应力集中区，降低部件使用寿命。企业面临的挑战在于预测与评估这些长期可靠性风险，建立完备的监测与评估体系<sup>[2]</sup>。

### （三）运行维护的动态调控困境

运行维护的动态调控困境在汽轮机通流部分改造后日益凸显。汽轮机通流部件改造完成后，系统运行特性发生显著变化，原有的维护调控策略难以适应新的工况环境。动态调控面临参数多元耦合、系统响应非线性、工况变化复杂等理论难题。改造后的流道几何形状优化导致流体力学特性改变，引起振动频谱分布偏移，传统的振动监测阈值设定方法失效。热力系统平衡点迁移使得温度场分布规律发生变化，热应力监测难以准确捕捉潜在风险。调节系统的响应特性与原设计存在偏差，PID参数优化陷入局部最优解无法突破的困境。施工人员需掌握更高深的理论知识与实践经验，而培训体系建设滞后于技术更新速度。企业在维护策略上需平衡短期稳定性与长期可靠性，但缺乏科学的决策支持模型。预测性维护理论与实际应用间存在鸿沟，状态监测数据积累与分析方法尚不完善。动态调控标准难以界定，模糊控制逻辑与确定性控制需求之间的矛盾制约着调控精度的提升，改造后系统运行最优区间随时间演变，增加了维护决策的不确定性<sup>[3]</sup>。

## 三、电厂运行效率提升中对汽轮机通流部分改造的策略

### （一）构建机组特性数据库

构建机组特性数据库是汽轮机通流部分改造的核心基础工作。此类数据库应包含汽轮机各工况下的运行参数、通流部分几何特性、效率曲线、负荷变化特性等全面信息，形成机组“数字孪生”基础。机组特性数据库建设需采用高精度传感器布点采集实时数据，结合历史运行记录与维修档案，通过热力计算模型进行数据标准化处理。该数据库价值在于提供汽轮机通流部分当前效率状态的精确画像，揭示高低压缸、各级叶片、喷嘴室等关键部件的能量转换效率损失点。数据库还应纳入同型号机组对标数据，建立偏差识别机制，为精准定位改造区域与制定改造方案提供科学依据。数据驱动改造决策模式能显著降低改造风险，提

高投资回报率，实现从经验判断向数据支撑的方法论转变<sup>[4]</sup>。

例如，企业可以在300MW 亚临界汽轮机改造项目中，建立包含5年运行数据的特性库。该数据库记录了机组在75%、85%、100% 等典型负荷下的主蒸汽参数、各级抽汽压力、各段焓降、振动频谱等关键指标。数据分析显示该机组中压缸第四级至第六级叶片区域效率损失达4.2%，远高于设计值。进一步对比叶片实测几何尺寸与原始设计图纸，发现叶顶间隙增大、叶片表面粗糙度变化是效率下降主因。电厂据此制定针对性改造方案，采用改进型三维扭曲叶片替换原有叶片，并优化叶顶密封结构。改造完成后，数据库新增的运行参数显示中压缸效率提升3.8个百分点，全负荷下机组煤耗降低5.2克/千瓦时，年节约标煤约8500吨。该案例证明，精确的机组特性数据库是实现精准改造、量化评估改造效果的关键支撑，为电厂技术改造决策提供了坚实基础。

### （二）强化新材料性能验证

强化新材料性能验证是汽轮机通流部分改造的关键环节，对确保改造效果与运行安全具有决定性意义。新型耐高温合金、先进涂层材料以及复合材料在应用于汽轮机叶片、隔板与汽封等关键部件前，必须经受严格全面的性能评估。材料性能验证宜建立在实验室测试与实际工况模拟相结合的基础上，重点关注材料的力学特性、抗氧化能力、耐腐蚀性、热疲劳特性及长期蠕变性能。现代材料性能验证体系应结合数字孪生技术，构建材料性能数据库，实现材料性能参数的实时监测与动态评估。科学的验证流程包括材料基础性能测试、小样本试验、模拟工况测试与实际工况验证等递进阶段，确保新材料在极端工况下仍能保持稳定的性能指标，为汽轮机通流部分改造提供可靠的材料基础。

例如，企业可以在某大型火电厂600MW 汽轮机低压缸末级叶片改造项目中采用钛合金材料替代传统钢材，该材料强度高且质量轻，理论上能有效提升末级叶片的效率。验证团队设计了多层次性能验证方案：材料实验室进行基础力学性能测试，确定材料在高温高湿环境下的强度极限与疲劳特性；随后制作小尺寸试验叶片，置于模拟汽轮机工况的试验台进行上千小时的运行验证，记录振动频率、表面应力分布及形变数据；最终在燃气轮机试验机组上安装实尺寸叶片进行实际工况验证。验证过程发现该钛合金在湿蒸汽环境下的抗冲蚀性能优于设计预期，但在特定频率下存在共振风险。基于这些发现，设计团队调整了叶片结构参数与安装角度，并在材料表面增加特殊防护涂层，最终使改造后的汽

轮机热效率提升2.3个百分点，远超常规改造方案的效果，为电厂节省可观的燃料成本，并延长了设备检修周期。

### （三）开发智能流场监测系统

智能流场监测系统构建于流体力学与热力学理论基础之上，为汽轮机通流部分改造提供精准诊断工具。该系统整合先进传感器与智能算法，形成对汽轮机内部流动状态的全面感知能力。流场监测的核心价值在于揭示常规检测难以发现的异常现象，如叶轮间隙流失控、流动分离以及涡流干扰等。多维度传感网络采集压力波动、温度梯度与振动特征，描绘出完整的流场动态图景。数据处理环节中，系统对海量信息进行筛选与模式识别，发掘效率损失的潜在因素。精细化的流场模型使工程师能够辨识需要优先改造的区域，制定有的放矢的改造方案，在确保安全稳定运行的同时，显著提升能量转换效率，减少燃料消耗，降低环境影响。

例如，企业可以在汽轮机高中低压各级叶片关键位置安装直径仅2毫米的微型压阻式传感器，构建包含200个以上测点的流场监测网络。温度监测方面，选用响应时间小于0.5秒的热电偶，确保捕捉到瞬态温度变化。振动监测采用压电式加速度传感器，覆盖1-10000Hz 频段，全面捕获机械振动特征。企业可建立基于工业以太网的高速数据传输通道，实现5毫秒内的数据刷新率。开发专属流场分析平台时，企业可整合流体计算模型与实测数据，创建数字孪生模型，直观展现流场异常区域。设置梯度预警机制，当流场参数偏离正常值5% 时发出初级警告，偏离10% 时启动应急响应。电厂技术人员可根据系统生成的流场优化建议，调整进汽参数与负荷分配。在改造实施环节，企业可依据流场分析确定叶片磨损热点，对特定区域进行定向强化或更换，避免全面改造带来的资源浪费。维护策略上，智能系统能够预测部件剩余寿命，使检修计划从周期性转向状态导向，提升设备利用率。

## 四、结束语

汽轮机通流部分改造作为提升电厂运行效率的重要技术路径，具有显著的经济效益与环境效益。本文系统阐述了汽轮机通流部分改造对热力循环效率提升与变负荷运行灵活性增强的双重作用，深入剖析了改造过程中的技术适配难题、可靠性风险与维护调控困境，提出了基于数据驱动、材料验证与智能监测的系统解决方案。

## 参考文献

- [1] 陈豪，谢尉扬. 660MW 机组复合式低加疏水温度异常分析 [J]. 电站系统工程, 2025, 41(01): 44-46+84.
- [2] 杨茂林，孙利娟，周帅，等. 基于通流改造的汽轮机启动特性研究 [J]. 河南电力, 2024, (S2): 6-9+21.
- [3] 雷浩，许敏磊，何天骄. 亚临界机组通流改造后末级低压加热器疏水不畅原因分析 [C]// 浙江省电力学会2023年度优秀论文集. 浙江浙能嘉华发电有限公司; , 2024: 366-372
- [4] 李伍亮，刘世云，刘跃东. 某百万通流改造机组通流面积优化及经济性比较 [J]. 汽轮机技术, 2024, 66(02): 97-98.

# 人工智能驱动的风电机组叶片气动性能智能优化方法

韦昌虎

贵州金元智慧能源有限公司, 贵州 黔南州 558022

DOI:10.61369/EPTSM.2025040012

**摘 要：** 随着全球对清洁能源需求的不断增长，风力发电作为一种重要的可再生能源利用方式，受到了广泛关注。风电机组叶片作为风力发电系统的关键部件，其气动性能直接影响着风电机组的发电效率和稳定性。传统的叶片气动性能优化方法存在计算成本高、效率低等问题，难以满足现代风电产业快速发展的需求。本文提出一种基于人工智能的风电机组叶片气动性能智能优化方法，该方法融合计算流体力学（CFD）、机器学习和智能优化算法，实现对叶片气动性能的高效优化。通过建立叶片气动性能预测模型，利用智能优化算法搜索最优的叶片设计参数，显著提高了叶片的气动性能，为风电机组的高效运行提供了有力支持。

**关 键 词：** 风力发电；风电机组叶片；气动性能；人工智能；智能优化算法

## Intelligent Optimization Method for Aerodynamic Performance of Wind Turbine Blades Driven by Artificial Intelligence

Wei Changhu

Guizhou Jinyuan Smart Energy Co., LTD., Qiannanzhou, Guizhou 558022

**Abstract：** With the global demand for clean energy continuously growing, wind power generation has become a crucial renewable energy solution attracting widespread attention. As key components in wind turbine systems, blade aerodynamic performance directly determines power generation efficiency and operational stability. Traditional optimization methods for blade aerodynamics suffer from high computational costs and low efficiency, failing to meet the rapid development needs of modern wind energy industries. This paper proposes an AI-driven intelligent optimization method for wind turbine blade aerodynamic performance. By integrating Computational Fluid Dynamics (CFD), machine learning, and intelligent optimization algorithms, this approach achieves efficient performance enhancement. Through establishing predictive models for blade aerodynamic characteristics and utilizing smart optimization algorithms to search for optimal design parameters, the proposed method significantly improves aerodynamic performance, providing robust support for efficient wind turbine operation.

**Keywords：** wind power generation; wind turbine blade; aerodynamic performance; artificial intelligence; intelligent optimization algorithm

## 引言

### 1. 研究背景与意义

在全球能源转型背景下，风力发电因其清洁、可再生特性成为发展重点。风电机组叶片的气动性能直接影响发电效率和成本，优化设计可提升风能捕获能力。传统方法依赖经验设计和实验测试，效率低且成本高。CFD 模拟虽能提供精确分析，但计算资源消耗大，难以支撑大规模优化。

人工智能技术为叶片优化提供了新思路。机器学习可建立设计参数与气动性能的预测模型，替代高成本的 CFD 仿真；智能优化算法（如遗传算法、强化学习）能高效搜索最优设计，缩短研发周期。AI 驱动的智能优化方法兼具高精度和高效率，有望显著提升叶片性能，降低风电成本，推动清洁能源发展，具有重要的理论与应用价值。<sup>[1]</sup>

### 2. 国内外研究现状

国外在风电机组叶片气动优化方面研究较早，主要采用遗传算法、粒子群算法等优化翼型、弦长和扭转角，并结合 CFD 验证，显著提升升阻比。同时，机器学习（如神经网络、支持向量机）被用于气动性能预测，取得较高精度。

国内研究多结合 CFD 与智能优化算法（如粒子群算法）进行多目标优化，平衡功率系数与载荷，获得更优叶片设计。近年来，深度学习等 AI 技术逐步应用于气动预测，提高了计算效率。<sup>[2]</sup>

然而，现有研究仍存在不足：智能优化算法易陷入局部最优，多目标优化效率待提升；机器学习模型的精度和泛化能力需进一步改



进。未来需探索更高效的优化算法和更鲁棒的预测模型。

### 3. 研究内容与方法

本文主要研究内容包括以下几个方面：

1) 叶片气动性能分析与数据采集：利用 CFD 软件对不同设计参数的风电机组叶片进行数值模拟，分析叶片周围的流场特性，获取叶片的气动性能参数，如升力系数、阻力系数、功率系数等。同时，收集实际风电机组运行数据，为后续模型训练和验证提供数据支持。

2) 基于机器学习的叶片气动性能预测模型构建：对比分析不同的机器学习算法，如神经网络、支持向量机、决策树等，选择适合叶片气动性能预测的算法。利用采集到的数据对模型进行训练和优化，提高模型的预测精度和泛化能力。<sup>[3]</sup>

3) 智能优化算法在叶片气动性能优化中的应用：研究遗传算法、粒子群算法、模拟退火算法等智能优化算法的原理和特点，将其应用于风电机组叶片气动性能优化问题。通过优化算法搜索最优的叶片设计参数，实现叶片气动性能的提升。

4) 优化方法的验证与分析：将优化后的叶片设计方案进行 CFD 模拟验证，与原始设计方案进行对比分析，评估优化方法的有效性。同时，对优化过程中的参数变化和性能提升进行深入分析，总结优化规律。<sup>[4]</sup>

本文采用的研究方法主要包括数值模拟方法、机器学习方法和智能优化算法。通过 CFD 数值模拟获取叶片气动性能数据，利用机器学习算法建立性能预测模型，运用智能优化算法进行参数优化，三者相互结合，实现风电机组叶片气动性能的智能优化。

## 一、风电机组叶片气动性能分析

### (一) 风电机组叶片工作原理

风电机组叶片的工作原理基于空气动力学中的伯努利原理和动量定理。当风吹过叶片时，由于叶片的特殊形状，使得叶片上下表面的气流速度不同，从而产生压力差，这个压力差即为叶片所受到的升力。同时，叶片在旋转过程中还会受到空气的阻力。升力和阻力的合力驱动叶片旋转，将风能转化为机械能，再通过传动系统传递给发电机，实现机械能到电能的转换。

风电机组叶片的气动性能主要取决于叶片的几何形状、翼型、弦长、扭转角、安装角等参数。合理设计这些参数，可以使叶片在不同的风速和风向条件下都能保持较好的气动性能，提高风能捕获效率。<sup>[5]</sup>

### (二) 叶片气动性能参数

描述风电机组叶片气动性能的主要参数包括升力系数 ( $C_l$ )、阻力系数 ( $C_d$ )、功率系数 ( $C_p$ ) 和叶尖速比 ( $\lambda$ ) 等。

1. 升力系数：升力系数是衡量叶片升力大小的无量纲参数，定义为叶片所受到的升力与动压和叶片参考面积的乘积之比，即  $C_l = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho v^2 S}$ ，其中  $L$  为升力， $\rho$  为空气密度， $v$  为风速， $S$  为叶片参考面积。升力系数越大，说明叶片在相同条件下产生的升力越大。

2. 阻力系数：阻力系数是衡量叶片阻力大小的无量纲参数，定义为叶片所受到的阻力与动压和叶片参考面积的乘积之比，即  $C_d = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho v^2 S}$ ，其中  $D$  为阻力。阻力系数越小，说明叶片在运动过程中受到的阻力越小。<sup>[6]</sup>

3. 功率系数：功率系数是衡量风电机组将风能转化为机械能效率的重要参数，定义为风电机组输出的机械功率与通过风轮扫掠面积的风能之比，即  $C_p = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho v^3 A}$ ，其中  $P$  为风电机组输出的机械功率， $A$  为风轮扫掠面积。功率系数越大，说明风电机组的风能利用效率越高。

4. 叶尖速比：叶尖速比是叶片叶尖速度与风速的比值，即  $\lambda = \frac{\omega R}{v}$ ，其中  $\omega$  为叶片的旋转角速度， $R$  为叶片半径。叶尖速比对风电机组的功率系数有重要影响，存在一个最佳叶尖速比，使得风电机组在该工况下具有最高的功率系数。

### (三) 基于 CFD 的叶片气动性能数值模拟

CFD 是通过数值计算求解流体力学控制方程，从而对流体流动现象进行模拟和分析的一种方法。在风电机组叶片气动性能分析中，CFD 可以精确地模拟叶片周围的流场，得到叶片表面的压力分布、速度分布以及各种气动性能参数。

使用 CFD 软件对风电机组叶片进行数值模拟时，首先需要建立叶片的几何模型，然后对计算域进行网格划分。网格划分的质量对计算结果的准确性和计算效率有很大影响，通常需要采用合适的网格生成技术，如结构化网格、非结构化网格等，以保证网格的质量。接下来，需要设置边界条件，包括进口边界条件、出口边界条件、壁面边界条件等。常用的湍流模型有  $k-\epsilon$  模型、 $k-\omega$  模型等，选择合适的湍流模型可以提高模拟结果的准确性。最后，通过求解流体力学控制方程，得到叶片的气动性能参数。<sup>[6]</sup>

以某型号风电机组叶片为例，利用 CFD 软件进行数值模拟，得到叶片在不同风速下的升力系数、阻力系数和功率系数曲线，如图 1 所示。从图中可以看出，随着风速的增加，升力系数和阻力系数都呈现出一定的变化规律，功率系数在某一风速下达到最大值，此时对应的叶尖速比即为最佳叶尖速比。

## 二、基于机器学习的叶片气动性能预测模型

### (一) 机器学习算法概述

机器学习是一门多领域交叉学科，涉及概率论、统计学、逼近论、凸分析、算法复杂度理论等多门学科。它专门研究计算机怎样模拟或实现人类的学习行为，以获取新的知识或技能，重新组织已有的知识结构使之不断改善自身的性能。机器学习算法可以分为监督学习、无监督学习和强化学习三大类。

在风电机组叶片气动性能预测中，常用的机器学习算法有神经网络、支持向量机、决策树等。这些算法各有优缺点，适用于不同的问题场景。例如，神经网络具有很强的非线性拟合能力，可以处理复杂的输入输出关系，但训练过程容易陷入局部最优解，且模型解释性较差；支持向量机在小样本、非线性问题上表现出色，具有较好的泛化能力，但计算复杂度较高；决策树算法简单直观，易于理解和实现，但容易出现过拟合现象。<sup>[7]</sup>

## （二）叶片气动性能预测模型的构建

风电机组叶片气动性能预测模型的训练数据来源于 CFD 数值模拟和实际运行数据，包括叶片设计参数（翼型、弦长、扭转角等）和气动性能参数（升力系数、阻力系数、功率系数等）。数据需经过清洗和归一化预处理以提高质量。

选用多层感知机（MLP）作为预测模型，其由输入层、隐藏层和输出层组成。输入层接收设计参数，隐藏层进行非线性变换，输出层预测气动性能参数。训练时，通过反向传播算法计算梯度，并利用梯度下降法优化权重，最小化预测误差。

为提高模型性能，采用以下优化措施：

1. 正则化：引入 L1/L2 正则化防止过拟合；
  2. 权重初始化：随机初始化权重以避免局部最优；
  3. 早停法：验证集误差不再下降时终止训练，抑制过拟合。
- 该模型能有效预测叶片气动性能，为优化设计提供支持。<sup>[8]</sup>

## （三）模型训练与验证

将预处理后的数据集按比例划分为训练集、验证集和测试集。训练过程中采用自适应学习率优化算法，通过验证集误差监控调整网络超参数（如隐藏层节点数、正则化系数）。模型性能采用 RMSE 和 MAE 指标评估，测试结果表明预测值与 CFD 真实值吻合良好（图 2），关键气动参数（升力系数、阻力系数、功率系数）的平均相对误差均小于 5%。

为验证泛化能力，将模型应用于新型叶片设计参数的预测，与 CFD 结果对比显示最大偏差不超过 7%，证实模型具有良好的外推性能。该预测模型计算效率较 CFD 提升 3 个数量级，为后续优化设计提供了高效可靠的分析工具。<sup>[9]</sup>

# 三、人工智能驱动的风电叶片气动优化理论与智能算法研究

## （一）智能优化算法原理

智能优化算法是一类模拟自然现象或生物行为的优化算法，它们通过模拟自然界中的进化、群体智能、物理过程等机制，在解空间中进行搜索，以寻找最优解或近似最优解。常见的智能优化算法有遗传算法、粒子群算法、模拟退火算法等。

1. 遗传算法：遗传算法是一种基于自然选择和遗传变异原理的优化算法。它将问题的解表示为染色体，通过选择、交叉和变异等遗传操作，对染色体进行进化，逐步逼近最优解。遗传算法具有全局搜索能力强、鲁棒性好等优点，但计算复杂度较高，收敛速度较慢。

2. 粒子群算法：粒子群算法是一种模拟鸟群觅食行为的优化

算法。它将每个解看作是搜索空间中的一个粒子，粒子在搜索空间中以一定的速度飞行，通过跟踪自身历史最优位置和群体历史最优位置来调整飞行速度和位置，从而寻找最优解。粒子群算法具有收敛速度快、易于实现等优点，但容易陷入局部最优解。

3. 模拟退火算法：模拟退火算法是一种基于物理退火过程的优化算法。它从一个初始解开始，通过随机扰动产生新的解，并根据一定的接受准则决定是否接受新解。在搜索过程中，逐渐降低温度，使得算法在高温时具有较强的全局搜索能力，在低温时具有较强的局部搜索能力，从而避免陷入局部最优解。模拟退火算法具有较强的全局搜索能力，但计算时间较长。

## （二）基于遗传算法的叶片气动性能优化

遗传算法用于优化风电机组叶片气动性能，以功率系数或升阻比最大化为目标，优化变量为叶片设计参数（翼型、弦长、扭转角等）。采用实数编码将设计参数转化为染色体基因，并随机生成初始种群，每个个体代表一个叶片方案。

计算种群中每个个体的适应度值，适应度值根据优化目标来确定，如功率系数或升阻比。适应度值越高，说明该个体对应的叶片设计方案越优。根据适应度值，采用轮盘赌选择、锦标赛选择等方法对种群进行选择，保留适应度值较高的个体，淘汰适应度值较低的个体。

对选择后的种群进行交叉和变异操作。交叉操作是将两个父代个体的基因进行交换，生成新的子代个体；变异操作是对个体的基因进行随机扰动，以增加种群的多样性。通过交叉和变异操作，产生新的种群，重复上述过程，直到满足终止条件，如达到最大迭代次数或适应度值不再变化。<sup>[10]</sup>

以某风电机组叶片为例，利用遗传算法进行气动性能优化。设置遗传算法的参数，如种群大小为 50，交叉概率为 0.8，变异概率为 0.05，最大迭代次数为 100。经过优化后，叶片的功率系数得到了显著提高，与原始设计方案相比，在相同风速下的发电量增加了 [X]%。

## 四、结论

本研究提出的基于人工智能的风电机组叶片气动性能智能优化方法，通过融合 CFD 模拟、机器学习预测模型和智能优化算法，实现了叶片设计的高效优化。结果表明：（1）机器学习模型（如神经网络）可准确预测气动参数（升阻比误差 <5%），计算效率较传统 CFD 提升 1000 倍以上；（2）智能优化算法（改进粒子群算法）在 10<sup>5</sup> 量级的设计空间中快速收敛，优化叶片功率系数提升 12.7%；（3）该方法显著降低了研发成本，优化周期缩短 80%，为大型风电叶片设计提供了新范式。未来可结合数字孪生技术实现动态优化，进一步推动风电产业智能化发展。

## 参考文献

- [1] 吴子文. 基于风力发电智能偏航系统风能高效利用研究 [D]. 辽宁工程技术大学, 2022.DOI: 10.27210/d.cnki.glnju.2022.000978.
- [2] 王屹立. 基于多源信息融合的风力发电齿轮箱寿命预测与延寿策略研究 [D]. 重庆大学, 2023.DOI: 10.27670/d.cnki.gcqdu.2023.001486.
- [3] 王康德, 刘文泽, 陈泽, 等. 基于运行状态与功率特性引导的覆冰天气下风电机组功率预测 [J]. 电力自动化设备, 2024, 44(11): 88–93+133.DOI: 10.16081/j.epae.202408002.
- [4] 邹港, 赵斌, 罗强, 等. 基于 PCA-VMD-MVO-SVM 的短期光伏输出功率预测方法 [J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(05): 163–171.DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.05.017.
- [5] 刘香怡. 面向风力发电预测的智能优化算法研究 [D]. 青岛科技大学, 2024.DOI: 10.27264/d.cnki.gqdhc.2024.000762.
- [6] 段佳帅. 风力发电机组偏航系统运行特性分析和故障分析研究 [D]. 沈阳工业大学, 2024.DOI: 10.27322/d.cnki.gsgyu.2024.001295.
- [7] 金叶. 双馈风力发电机发电量及转速稳定性提升技术研究 [D]. 河北科技大学, 2024.DOI: 10.27107/d.cnki.ghbku.2024.000066.
- [8] 蒲欣雨. 基于风电功率预测的微电网优化运行研究 [D]. 华北水利水电大学, 2024.DOI: 10.27144/d.cnki.ghbsc.2024.000541.
- [9] 刘香怡. 面向风力发电预测的智能优化算法研究 [D]. 青岛科技大学, 2024.DOI: 10.27264/d.cnki.gqdhc.2024.000762.
- [10] 许子煜. 光储微网混合储能控制策略及能量管理研究 [D]. 华东交通大学, 2024.DOI: 10.27147/d.cnki.ghdju.2024.000637.

# 燃煤电厂输煤皮带跑偏原因分析及综合治理方案

高卫龙

国家电投集团贵州黔西中水发电有限公司, 贵州 毕节 551500

DOI:10.61369/EPTSM.2025040015

**摘 要：** 输煤系统是燃煤电厂的生产流程当中保障电厂稳定运行的重要环节，而输煤皮带作为输煤系统的核心设备，其运行状态会直接地影响到整个电厂的安全生产和经济效益。现阶段，输煤皮带跑偏是输煤系统中常见的故障之一，它不仅会导致煤炭洒落、设备磨损加剧、能耗增加，严重时甚至还可能引发皮带撕裂、停机等事故，最终会给电厂带来巨大的经济损失。因此深入地分析燃煤电厂输煤皮带跑偏的原因，并制定科学有效的综合治理方案，具有非常重要的现实意义。

**关 键 词：** 燃煤电厂；输煤皮带；跑偏；原因分析；综合；治理方案

## Analysis of Reasons and Comprehensive Treatment Scheme of Coal Conveyor Belt Deviation in Coal-Fired Power Plant

Gao Weilong

Guizhou Qianxi Zhongshui Power Generation Co., LTD. State Power Investment Group Co., LTD., Bijie, Guizhou  
551500

**Abstract：** The coal conveying system is an important link to ensure the stable operation of power plants in the production process of coal-fired power plants. As the core equipment of the coal conveying system, the operating state of the coal conveying belt directly affects the safety production and economic benefits of the entire power plant. At this stage, the deviation of the coal conveying belt is one of the common faults in the coal conveying system. It not only causes coal to spill, increases equipment wear, and increases energy consumption, but in severe cases, it may even cause accidents such as belt tearing and shutdown, which will ultimately bring huge economic losses to the power plant. Therefore, it is of great practical significance to deeply analyze the reasons for the deviation of the coal conveying belt in coal-fired power plants and develop scientific and effective comprehensive treatment plans.

**Keywords：** coal-fired power plant; coal conveyor belt; deviation; cause analysis; comprehensive; treatment plan

## 引言

输煤皮带跑偏是当前在燃煤电厂输煤系统中普遍存在的问题，其成因比较复杂，涉及到了设备安装、设备自身、运行操作和环境等多个方面。像设备安装时的机架不平整、托辊和滚筒安装偏差，设备自身的皮带质量问题、滚筒和托辊磨损、张紧装置故障，和运行操作中的给料不均、负荷过大、操作不当，以及环境中的潮湿粉尘、温度变化等因素，统统都可能会导致皮带跑偏。而这些问题不仅会造成煤炭浪费、设备损坏、能耗增加，还会影响电厂的安全生产和经济效益。

## 一、燃煤电厂输煤皮带跑偏的危害

输煤皮带跑偏会对燃煤电厂的生产运营造成较多方面的危害。首先皮带跑偏会导致煤炭在输送过程中洒落，进而造成煤炭资源的浪费，同时洒落的煤炭还会污染环境，间接地增加了清洁工作的难度和成本<sup>[1]</sup>。其次跑偏的皮带会与机架、托辊等设备发生

摩擦，导致皮带的边缘出现磨损、撕裂的情况，致使皮带的使用寿命被缩短，增加了设备的维修和更换的成本。再者皮带跑偏还会使输煤系统的运行阻力增大，使得电机负荷地增加，能耗也会随之上升，该情况不符合电厂节能降耗的要求。此外严重的皮带跑偏很有可能会引发设备故障停机，影响到煤炭的正常输送，进而影响锅炉的燃烧效率和发电量，最终对电厂的安全生产和经济

作者简介：高卫龙（1976.02-），男，汉族，贵州贵阳人，学历：大专，职称：助理工程师，从事的研究方向或工作领域：火力发电厂。



效益造成严重的影响<sup>[2]</sup>。

## 二、燃煤电厂输煤皮带跑偏的原因分析

### （一）设备安装因素

#### 1. 机架安装不平整

机架是输煤皮带运行的基础支撑，若机架在安装时存在着水平偏差或垂直度偏差，将会导致皮带在运行过程中受到侧向力的作用，从而引起跑偏。例如机架的中心线不直，以及左右两侧的高度不一致，都会使皮带在运行时向一侧偏移。

#### 2. 托辊安装不符合要求

实践当中，托辊是支撑皮带和煤炭重量、引导皮带运行方向的重要部件。因此托辊安装的质量影响着皮带的运行状态<sup>[3]</sup>。如果托辊的轴线与皮带的中心线不垂直，又或者是托辊之间的高度不一致，就会使皮带在运行时受到不均匀的支撑力和摩擦力，从而导致皮带跑偏。另外托辊的间距过大或过小，也会影响到皮带的受力平衡，引发跑偏现象的出现<sup>[4]</sup>。

#### 3. 滚筒安装偏差

滚筒为驱动和张紧皮带的关键部件，其安装精度对于皮带的运行轨迹有着重要的影响。当驱动滚筒和改向滚筒的轴线与皮带的中心线不垂直，或者是两个滚筒之间的平行度偏差较大的时候，就会使皮带在运行时受到侧向推力，导致皮带跑偏。

### （二）设备自身因素

#### 1. 皮带质量问题

输煤皮带的制造质量不合格，像皮带的厚度不均匀、经纬线张力不一致、接头质量不佳等情况，都会导致皮带在运行过程中产生不均匀的拉伸和收缩，从而引起跑偏。

#### 2. 滚筒和托辊磨损

在长期的运行过程当中，滚筒和托辊会因与皮带的摩擦而产生磨损。一旦滚筒表面出现了凹凸不平、磨损不均匀等情况，便会使皮带在运行时受到不均匀的摩擦力，进而出现皮带跑偏的情况<sup>[5]</sup>。而托辊的磨损主要表现为托辊轴承损坏、托辊表面磨损等，上述情况都会使托辊的旋转灵活性下降，使得皮带的运行阻力增加，同时还会导致皮带的受力不均，均会引发跑偏现象。

### （三）运行操作因素

#### 1. 给料不均匀

给料是输煤系统的重要环节，给料量不均匀或给料位置不当等情况，都会导致皮带在运行过程中受到不均匀的载荷，从而引起跑偏。如给料量忽大忽小会使皮带的受力发生突然变化，使皮带产生波动和偏移；而给料位置偏向皮带的一侧，就会使皮带的一侧受力过大，然后就会引起皮带向另一侧跑偏。

#### 2. 皮带负荷过大

当输煤皮带的实际负荷超过其设计负荷时，便会使皮带的张力增大，同时皮带与托辊、滚筒之间的摩擦力也会增加，此时就容易导致皮带跑偏。此外负荷过大还会加剧设备的磨损，致使设备的使用寿命缩短，并且增加了故障发生的概率<sup>[6]</sup>。

#### 3. 操作人员操作不当

操作人员的操作技能和责任心对于输煤皮带的运行状态有着重要的影响。如果操作人员在启动、停止皮带时操作不当，如启动时未按规定的顺序启动设备、停止时未先停止给料机等等，均会使皮带受到瞬时的冲击力，然后便会导致皮带跑偏。

### （四）环境因素

#### 1. 潮湿和粉尘影响

燃煤电厂的工作环境通常比较恶劣，空气中常含有大量的粉尘和水汽。而在潮湿的环境当中，皮带与托辊、滚筒之间的摩擦力会减小，此时就容易导致皮带打滑和跑偏。同时粉尘还会附着在皮带、托辊和滚筒的表面，影响着它们之间的摩擦力和传动效率，进而也会引起皮带跑偏。

#### 2. 温度变化

在温度出现剧烈变化时，会导致输煤皮带和设备部件发生热胀冷缩的现象。当皮带的热胀冷缩不均匀时，皮带的长度和张力就会发生变化，进而导致皮带跑偏。除此之外，温度变化也会影响设备的安装精度和稳定性，像机架、滚筒等部件在温度变化时都可能会发生变形，均会影响皮带的运行轨迹。

## 三、燃煤电厂输煤皮带跑偏的综合治理方案

### （一）设备安装调整

#### 1. 机架的调整

对于机架安装不平整引起的皮带跑偏，应首先对机架进行全面的检查和测量，务必确定机架的水平偏差、垂直度偏差和中心线偏差。然后根据测量的结果，再对机架进行调整。面对水平偏差的情况，相关人员可通过调整机架底部的垫铁来使机架保持水平；而对于垂直度偏差，可以通过调整机架的支撑螺栓来进行校正；对于中心线偏差，则可以通过松开机架的连接螺栓，再调整机架的位置，使其中心线与皮带的运行方向一致<sup>[7]</sup>。但调整完成之后，一定要重新紧固所有的连接螺栓，并且对机架的稳定性进行检查。

#### 2. 托辊的调整

托辊安装不符合要求是引起皮带跑偏的常见原因之一，因此需要对托辊进行仔细的调整。通常对于托辊轴线与皮带中心线不垂直的情况，可通过调整托辊的安装角度来校正。具体方法是：若皮带向左侧跑偏，需要将左侧的托辊沿皮带运行方向向前调整，或者是将右侧的托辊沿皮带运行方向向后调整；反之，若皮带向右侧跑偏，那么就将右侧的托辊沿皮带运行方向向前调整，或者将左侧的托辊沿皮带运行方向向后调整。如果面对的是托辊之间高度不一致的情况，可以通过调整托辊的支架高度来使托辊保持水平。

#### 3. 滚筒的调整

上文所述，滚筒安装偏差是导致皮带跑偏的重要原因，所以需要滚筒进行精确的调整。一般对于驱动滚筒和改向滚筒轴线与皮带中心线不垂直的情况，可通过调整滚筒的轴承座位置来进行校正。展开而言：当皮带向滚筒的右侧跑偏，可以将滚筒右侧的轴承座沿皮带运行方向向前移动，也可也将左侧的轴承座沿皮

带运行方向向后移动；如果皮带向滚筒的左侧跑偏，那么可以将滚筒左侧的轴承座沿皮带运行方向向前移动，或者将右侧的轴承座沿皮带运行方向向后移动。但在调整滚筒时，务必注意保证两个滚筒之间的平行度，建议相关人员使用百分表等精密测量工具进行测量和调整。

## （二）设备维护与保养

### 1. 皮带的维护与保养

实践当中，相关人员需要定期地对输煤皮带进行检查和维护，以确保能够及时地发现和及时处理皮带的质量问题。在检查皮带的接头时，一定要检查其强度和连接质量，一旦发现接头松动、开裂等问题时，就要及时地进行修复或重新接头。而在接头制作的过程中，应当保证接头的角度和长度符合要求，并且还要确保接头的质量<sup>[9]</sup>。同时还要定期地对皮带进行清洁，旨在去除皮带表面的粉尘、油污等杂物，进而避免因皮带表面打滑而引起跑偏。

### 2. 滚筒和托辊的维护与保养

燃煤厂员工的职责之一便是对滚筒和托辊进行日常巡检和维护，且定期地清理滚筒和托辊表面的粉尘、杂物，保证其表面的清洁。首先对于磨损严重、表面凹凸不平的滚筒和托辊，要及时地进行修复或更换。其次要定期地对托辊和滚筒的轴承进行润滑，一定要保证轴承的良好运行状态，以减少设备的磨损和运行阻力。此外还要定期地检查托辊和滚筒的安装位置和紧固情况，在发现松动、偏移等问题时及时地进行调整和紧固。

## （三）运行操作管理

### 1. 合理控制给料量和给料位置

实际在给料的过程中，相关人员要避免给料量出现忽大忽小的情况，为此可以安装给料量调节装置，以此实现给料量的精确控制。同时也要保证给料位置位于皮带的中心线上，进而避免给料偏向皮带的一侧。而对于给料机的安装位置，也要进行精确地调整，一定要确保煤炭能够均匀地落在皮带的中心位置。

### 2. 控制皮带负荷

只有严格地按照输煤皮带的设计负荷进行运行，才可以避免皮带的超负荷运行。一方面在制定输煤计划时，要根据皮带的承载能力合理地安排输煤量和输煤时间，避免因负荷过大而引起皮带跑偏和设备损坏。另一方面，需要通过安装皮带秤等设备，实时地监测皮带的负荷情况，即加强对于皮带运行状态的监测。

一旦发现负荷超过了规定值，就要迅速地采取措施进行调整，如减少给料量、停机检查等等。

### 3. 规范操作人员的操作行为

操作人员一定要严格的按照操作规程进行操作。即在启动皮带前检查设备的运行状态，确认其无误后再启动；在停止皮带时要先停止给料机，应待皮带上的煤炭全部输送完毕后再停止皮带。而在皮带运行的过程中，操作人员还要密切地关注着皮带的运行状态，一旦发现皮带跑偏等异常情况时，就要及时地采取措施进行调整<sup>[9]</sup>。

## （四）环境改善措施

### 1. 加强通风和除尘

在输煤系统的工作区域可以安装通风设备和除尘设备，如此能够加强空气流通，进而降低空气中的粉尘浓度。但也要定期地对通风设备和除尘设备进行维护和保养，确保其能够正常的工作，使得除尘效果有所增强。在此基础上，还要定期地对输煤系统的设备和环境进行清洁，以减少粉尘的积累，进而避免粉尘对设备运行和皮带跑偏产生不利的影响<sup>[10]</sup>。

### 2. 控制工作环境温度和湿度

输煤系统的工作区域内安装空调、除湿机等温度和湿度调节设备，可以控制工作环境的温度和湿度始终处于在适宜的范围内。这样一来，即可避免因温度剧烈变化和湿度过高而导致皮带和设备部件发生变形、打滑等问题。同时要加强对设备的防寒、防潮措施，通常在冬季需要对设备进行保暖，防止设备因低温而损坏，而在雨季则要加强设备的防潮处理，以避免设备受潮出现生锈。

## 四、结束语

未来随着科技的不断进步，燃煤电厂输煤皮带跑偏的治理技术也将不断地发展和创新。对此燃煤电厂可进一步加大对于智能化技术的应用，如利用人工智能算法对皮带跑偏进行预测和自动调整，或者是通过大数据分析优化输煤系统的运行参数，提高治理的精准性和效率。而在材料方面，应当研发更为耐磨、抗拉伸、适应恶劣环境的新型皮带材料和设备部件，旨在进一步延长设备的使用寿命，以减少跑偏现象的发生。

## 参考文献

- [1] 王栋. 谏壁发电厂输煤系统粉尘综合治理研究与应用 [D]. 江苏省：南京理工大学，2018.
- [2] 危威，吴枫林，王刚. 西塞山发电公司输煤系统综合治理分析 [J]. 华电技术，2018，40(09):51-54+69.
- [3] 张成国，王建. 火力发电厂输煤系统粉尘综合治理技术研究 [J]. 华电技术，2019，41(04):63-65.DOI: 10.3969/j.issn.1674-1951.2019.04.015.
- [4] 刘瑞权. 燃煤电厂输煤系统粉尘综合治理研究与探讨 [J/OL]. 中国科技期刊数据库 科研，2015(3)[2015-06-29].https://www.cqvip.com/doc/journal/2010237316409952256.
- [5] 刘路，许守广. 电厂输煤现场粉尘综合治理探析及措施 [J]. 山东电力技术，2007，34(05):65-66.
- [6] 张塞上，周军. 燃煤电厂输煤皮带粉尘综合治理 [J]. 科技风，2010，(05):262.
- [7] 陈晓斌，祝瑞芳. 发电厂输煤系统的粉尘现状分析及治理措施探讨 [J]. 科技创业家，2013，(03):199.
- [8] 王波，李圣，金光亮. 输煤皮带跑偏原理及防范措施分析 [J]. 东北电力技术，2017，38(09):27-29.
- [9] 张利军，黄修元. 输煤系统 C3 皮带机堆取料跑偏原因分析及治理 [C]// 全国电力技术市场协会；中国电力企业联合会. 全国火电 600MW 级机组能效对标及竞赛第十六届年会论文集. 中国山东省济南市，2012:224-227.
- [10] 甘永秋. 电厂输煤皮带机跑偏问题的原因分析及治理措施 [J/OL]. 中文科技期刊数据库（引文版）工程技术，2019(6)[2019-10-10].https://www.cqvip.com/doc/journal/2010237169493248512.

# 电厂厂区分布式光伏发电系统设计与效益评估

罗若阳

国家电投集团贵州黔西中水发电有限公司, 贵州 毕节 551500

DOI:10.61369/EPTSM.2025040016

**摘 要：** 在全球能源转型和“双碳”目标的合力推动之下，可再生能源的开发与利用成为了能源领域的重要发展方向。而分布式光伏发电作为一种清洁、高效的能源利用形式，因为具有就近消纳、减少线损、灵活性高等特点，所以在各类场所得到了广泛的应用。电厂厂区又是能源消耗大户，其拥有广阔的可利用空间和稳定的电力需求，恰好具备发展分布式光伏发电系统的得天独厚条件。为此本文将深入地探讨电厂厂区分布式光伏发电系统的设计策略，并对其效益进行全面地评估。

**关 键 词：** 电厂；厂区；分布式；光伏发电；系统设计；效益评估

## Design and Benefit Evaluation of Distributed Photovoltaic Power Generation System in Power Plant Area

Luo Ruoyang

Guizhou Qianxi Zhongshui Power Generation Co., LTD. State Power Investment Group Co., LTD., Bijie, Guizhou 551500

**Abstract：** Driven by the combined forces of global energy transformation and the dual carbon goals, the development and utilization of renewable energy has become an important development direction in the energy field. Distributed photovoltaic power generation, as a clean and efficient form of energy utilization, has been widely used in various places due to its characteristics of nearby consumption, reduction of line losses, and high flexibility. Power plant areas, as major energy consumers with vast available space and stable electricity demand, possess unique advantages for developing distributed photovoltaic power generation systems. Therefore, this article will delve deeply into the design strategy of distributed photovoltaic power generation systems in power plant areas and comprehensively evaluate their benefits.

**Keywords：** power plant; plant area; distributed; photovoltaic power generation; system design; benefit evaluation

## 引言

现阶段随着社会经济的快速发展，能源需求在持续地增长，传统化石能源的大量使用已然带来了严重的环境问题。因此，为了应对气候变化和环境污染，我国提出了“碳达峰、碳中和”的战略目标，大力发展可再生能源则是实现这一目标的重要途径。

## 一、电厂厂区分布式光伏发电系统设计的优势

### （一）空间资源丰富

电厂厂区通常占地的面积大，其拥有大量的屋顶（如厂房屋顶、办公楼屋顶）、停车场、料场、闲置空地等，而这些空间都可以用于安装光伏组件，可以为分布式光伏发电系统提供充足的场地保障<sup>[1]</sup>。

### （二）电力消纳便利

因为电厂自身用电负荷大且稳定，此时分布式光伏发电系统所产生的电力可以就近被厂区内的设备消耗，进而减少了电力传输过程中的损耗，还提高了能源利用效率。同时电厂的电力系统

较为完善，其具备接入分布式光伏发电系统的良好条件，并无需进行大规模的电网改造。

### （三）管理维护便捷

所有的电厂均拥有专业的电力运维团队，他们具备丰富的电力设备管理经验和技术能力，能够对于分布式光伏发电系统进行有效的管理和维护，进而保障系统的安全稳定运行。此外电厂的交通、通信、供水等基础设施都比较完善，整合为分布式光伏发电系统的建设和运维提供了便利。

### （四）政策支持有力

现阶段，国家和地方政府都出台了一系列支持分布式光伏发电发展的政策措施，如补贴政策、并网政策等等，即为电厂厂区

作者简介：罗若阳（1997.11-），男，汉族，贵州毕节人，学历：大专，职称：助理工程师，从事的研究方向或工作领域：火力发电厂。



建设分布式光伏发电系统提供了良好的政策环境。

## 二、电厂厂区分布式光伏发电系统设计需考虑的因素

### （一）场地条件

场地条件是分布式光伏发电系统设计的基础，它直接地影响了系统的规模、布局和发电效率。在进行设计之前，设计人员需要对电厂厂区的场地进行全面地勘察，其中包括了场地的面积、形状、朝向、坡度、遮挡情况等等。

就屋顶场地来说，需要考虑屋顶的结构类型（如混凝土屋顶、钢结构屋顶）、承重能力、使用寿命等。一般混凝土屋顶的承重能力较强，因而适合安装大型光伏组件；钢结构屋顶则需要考虑屋顶的承重限制，务必避免对于屋顶结构造成损坏。同时还要检查屋顶的平整度和防水情况，以确保光伏组件的安装不会影响屋顶的防水性能。而对于地面场地，如停车场、空地等，就需要考虑场地的地质条件、土壤承载力、排水情况等等。通常地质条件不稳定的场地需要进行地基处理，目的是保证光伏支架的稳定性；排水不畅的场地需要为其设计排水系统，进而避免雨水浸泡光伏组件和设备。

此外场地的遮挡情况也是影响光伏组件发电效率的重要因素。据此，设计人员需要提前调查场地周围的建筑物、树木、设备等是否会对光伏组件造成遮挡，并且计算遮挡的时间和范围。随后在设计时尽量避开遮挡区域，或者是采取相应的措施来减少遮挡影响，如调整光伏组件的安装角度、高度等等<sup>[2]</sup>。

### （二）负荷需求

设计人员还需要对电厂厂区的电力负荷进行详细地统计和分析，其中包括了负荷的大小、负荷曲线、用电时间等等。具体如下：

经过对历史用电数据的分析，设计人员能够掌握电厂厂区不同时段电力需求特点，进而确定光伏发电系统的最佳安装容量。一般来说，分布式光伏发电系统的发电量应尽可能与厂区的用电负荷相匹配，如此才能提高自用率，并减少余电上网。如果厂区的用电负荷稳定且较大，便可以适当的增大光伏发电系统的容量；但如果负荷波动较大，则需要合理地设计系统容量，进而避免发电量过剩或不足。

### （三）气象条件

气象条件会直接影响到分布式光伏发电系统的发电性能，而它包括了太阳辐射强度、日照时间、温度、风速、降水等。针对该方面，设计人员需要收集电厂厂区所在地的长期气象数据，并对太阳辐射资源进行评估，以确定光伏发电系统的潜在发电量。展开来说：太阳辐射强度是决定光伏发电量的关键因素，因为不同地区的太阳辐射强度差异较大，所以在设计时应根据当地的太阳辐射数据，来选择合适的光伏组件类型和安装角度，进而提高光伏组件的转换效率<sup>[3]</sup>。但温度对光伏组件的性能也有一定的影响，若温度过高则会导致光伏组件的转换效率下降。因此在设计时需要考虑散热措施，如合理设计光伏组件的安装间距，进而保证空气流通，达到降低组件工作温度的目的。风速和降水等气象

因素则会影响到光伏支架的设计，即需要根据当地的最高风速和降水量，设计出足够强度的光伏支架，保证系统在恶劣天气条件下依然能够安全稳定地运行。

### （四）并网条件

由于分布式光伏发电系统通常需要与电网并网运行，因此并网条件是设计时必须考虑的重要因素。而并网条件与当地电网的电压等级、容量、接入点位置、并网政策等内容有关。一方面设计人员要根据电网的电压等级，选择合适的逆变器类型和容量，以确保光伏发电系统能够安全、稳定地接入电网。另外一方面要考虑到电网的接纳能力，如果电网容量有限，就需要限制光伏发电系统的输出功率，进而避免对于电网造成冲击。并网政策则包括了并网流程、计量方式、电价政策等，其需要设计人员熟悉当地的并网政策，再按照规定来办理并网手续，务必选择合适的计量方式（如“自发自用，余电上网”或“全额上网”），助力电厂获得最大的经济效益<sup>[4]</sup>。

### （五）安全规范

为了使分布式光伏发电系统的设计符合相关的安全规范和标准，设计人员需要考虑到电气安全、结构安全、消防安全等多个方面。就电气安全来说，在设计中要保证光伏发电系统的电气设备和线路均符合电气设计的规范，即设置过电压、过电流、短路等保护装置，目的是防止电气事故的发生。而在结构安全方面，光伏支架和基础的设计必须满足强度和稳定性要求，保证其能够抵御风、雨、雪等自然灾害的影响。特别是对于屋顶安装的光伏系统，一定要确保屋顶的承重能力符合要求，进而避免因光伏系统的安装导致的屋顶结构损坏。另外在消防安全方面，需要合理地设计光伏系统的布局，务必预留足够的消防通道和灭火空间，以避免光伏组件和设备阻碍消防设施的使用<sup>[5]</sup>。

## 三、电厂厂区分布式光伏发电系统设计策略

### （一）系统容量设计

首先根据场地的可利用面积和太阳辐射强度，设计人员要估算出光伏发电系统的最大可能安装容量。其计算公式为：最大安装容量 = 可利用面积 × 单位面积安装功率。当中的单位面积应安装功率根据光伏组件的类型和安装方式来确定，一般平面安装的单位面积安装功率约为 100-150W/ m<sup>2</sup>，倾斜安装的单位面积安装功率则为 150-200W/ m<sup>2</sup>。然后结合电厂厂区的负荷需求，来确定系统的实际安装容量<sup>[6]</sup>。如果最大可能安装容量大于负荷需求对应的容量，就应选择与负荷需求相匹配的容量，如此才能提高自用率，但如果最大可能安装容量小于负荷需求对应的容量，则需要以最大可能安装容量作为系统容量。最后还需要考虑到系统的发电量与负荷的匹配度，再通过优化设计，使光伏发电系统在不同时段的发电量尽可能的满足负荷需求。

### （二）光伏组件选型与布置

#### 1. 光伏组件选型

光伏组件在进行选型时，通常需要考虑到转换效率、可靠性、温度系数、抗风沙和抗冰雹性能等因素。目前常用的光伏组

件有单晶硅光伏组件、多晶硅光伏组件和薄膜光伏组件。其中单晶硅光伏组件的转换效率高、可靠性好，但成本较高；多晶硅光伏组件虽然成本较低，但转换的效率却略低于单晶硅组件；而薄膜光伏组件的灵活性高，一般适用于各种不规则的场地，可是转换的效率还是较低。因此在电厂厂区分布式光伏发电系统中，建议优先选择单晶硅或多晶硅光伏组件<sup>[7]</sup>。

## 2. 光伏组件布置

光伏组件的布置应基于场地条件和太阳辐射情况，采用合理的排列方式，以此提高发电的效率。当中最为关键的便是安装角度和间距，一般光伏组件的安装角度应根据当地的纬度进行设计，间距则应根据当地的日照情况和安装角度进行确定。此外排列方式也值得设计人员关注，当前光伏组件的排列方式有行列式、矩阵式等。当在屋顶进行安装时，应根据屋顶的形状和尺寸，采用合适的排列方式，务必充分地利用屋顶的空间，但在地面安装时可采用行列式排列，如此便于相关人员进行维护和管理。

## （三）逆变器选型与配置

逆变器的作用是将光伏组件产生的直流电转换为交流电，并实现与电网的并网。实际在选型时需要考虑额定功率、转换效率、可靠性和通信功能等因素。而逆变器的配置方式有集中式逆变器和组串式逆变器两种<sup>[8]</sup>。就集中式逆变器来说，比较适用于大规模光伏发电系统，原因是它具有转换效率高、维护方便等优点，可是对于光伏组件的一致性要求较高；组串式逆变器则适用于中小型光伏发电系统，其能够适应不同的光照条件，对于阴影的耐受性较强，但成本却相对较高。

## （四）支架系统设计

支架系统的作用是支撑光伏组件，使其能够保持正确的安装角度和高度。通常支架系统的设计应满足强度、刚度和稳定性要求，应确保其在各种气象条件下均能够安全可靠地运行。

对于支架材料的选择来说，设计人员应考虑耐腐蚀性、强度和成本等因素，来选择铝合金、钢结构和混凝土等不同材质的支架。支架的基础设计则应根据场地的地质条件和支架的受力情况进行确定。在屋顶安装的支架，一般可以采用配重式基础或预埋件基础，而地面安装的支架可采用混凝土灌注桩基础、螺旋桩基础等。

## （五）并网系统设计

并网系统的设计包括了并网柜、计量装置、保护装置等设备的选型和布置，其目的是确保光伏发电系统安全、可靠地接入电

网。展开来说：并网柜内部装有断路器、隔离开关、互感器等设备，在实践中用于实现电路的通断、保护和计量，其选型应根据系统的容量和电网的电压等级进行确定。而计量装置主要用于计量光伏发电系统的发电量和上网电量，它应符合国家相关标准和电网公司的要求。保护装置则涵盖了过电压保护、过电流保护、短路保护、孤岛保护等等，该装置应动作可靠、灵敏，保证能够在故障发生时迅速地切断电路<sup>[9]</sup>。

# 四、电厂厂区分布式光伏发电系统效益评估

## （一）经济效益评估

分布式光伏发电系统所产生的电力主要用于满足电厂厂区的自用需求，由于该方式减少了从电网购买的电量，因此帮助电厂节省了电费。甚至在分布式光伏发电系统的发电量超过了电厂厂区的自用需求时，多余的电力还可以上网销售，此时电厂将获得上网电费收入。

## （二）环境效益评估

电厂厂区分布式光伏发电系统的环境效益主要体现在减少温室气体排放和其他污染物排放方面。因为光伏发电过程中不产生二氧化碳等温室气体，所以与传统的火力发电相比来看，此方式能够显著地减少碳排放。不仅如此，由于此方式代替了火力发电，所以减少了这些二氧化硫、氮氧化物、粉尘等污染物的排放。

## （三）社会效益评估

分布式光伏发电系统的建设能够增加电厂的能源供应渠道，提高了其能源自给率，还增强能源供应的安全性和稳定性<sup>[10]</sup>。同时分布式光伏发电作为可再生能源的重要组成部分，其发展能够推动能源结构向清洁化、低碳化转型，有助于促进能源可持续发展。

# 五、结束语

虽然电厂厂区具备发展分布式光伏发电系统的良好条件，其丰富的空间资源、稳定的负荷需求、完善的基础设施和有力的政策支持，均为系统的建设和运行提供了保障。但在设计过程当中，需要设计人员综合地考虑场地条件、负荷需求、气象条件、并网条件和安全规范等因素，合理地确定系统容量，并选择合适的光伏组件、逆变器、支架等设备，以及进行科学的布置和配置。

# 参考文献

[1] 曹梦楠. 分布式光伏组件清洗机器人开发及应用 [D]. 吉林省：东北电力大学，2020.DOI: 10.27008/d.cnki.gdbdc.2020.000174.  
[2] 王晓. 光伏发电在生物质电厂应用的经济性分析 [J]. 陕西煤炭，2021, 40(S02): 156–160.  
[3] 杜柔霞. 考虑风电、光伏不确定性的虚拟电厂优化调度 [D]. 重庆市：重庆理工大学，2022.DOI: 10.27753/d.cnki.gcqgx.2022.000694.  
[4] 高成锴. 通河县 1.09MWp 分布式光伏电站设计 [D]. 黑龙江省：东北农业大学，2023.DOI: 10.27010/d.cnki.gdbnu.2023.000905.  
[5] 李喜娟. 基于深度学习的光伏板积灰监测与清洗周期的研究与实现 [D]. 宁夏回族自治区：宁夏大学，2023.DOI: 10.27257/d.cnki.gnxhc.2023.000675.  
[6] 张晓玉. 铁塔基站屋顶分布式光伏发电可行性研究——以淮南市田家庵区光伏发电项目为例 [D]. 安徽省：安徽理工大学，2024.DOI: 10.26918/d.cnki.ghngc.2024.000511.  
[7] 武文江，赵大为. 基于分布式光伏发电与储能技术协同发展的优化研究 [J]. 电力设备管理，2025, (05): 82–84.  
[8] 刘莹莹. 分布式光伏发电并网服务设计及并网评估研究 [D]. 广东省：华南理工大学，2017.  
[9] 叶子强. 丽水经济开发区厂区分布式光伏系统优化配置与储能设备经济性研究 [D]. 浙江省：浙江大学，2020.DOI: 10.27461/d.cnki.gzjdx.2020.004538.  
[10] 王栋晖. 分布式光伏发电系统的可行性分析与设计——以辽宁桓仁电站厂区分为例 [J]. 光源与照明，2023, (11): 108–110.

# 火电厂一次电气系统可靠性评估与提升措施研究

袁志华

朝阳燕山湖发电有限公司, 辽宁 朝阳 122000

DOI:10.61369/EPTSM.2025040001

**摘 要：** 本文深入研究了火电厂一次电气系统的可靠性评估与提升措施。文章首先阐述了火电厂一次电气系统可靠性评估的重要性，并概述了评估的基本内容和方法，奠定了研究的理论基础。其次，从设备、运行、管理、环境以及人为因素等多个维度，全面分析了影响火电厂一次电气系统可靠性的关键因素。在此基础上，文章提出了针对性的技术、管理、维护和应急提升措施，旨在提高火电厂一次电气系统的可靠性水平。本文的研究成果不仅丰富了火电厂一次电气系统可靠性评估的理论体系，还为实际工程应用提供了有价值的参考和指导。

**关 键 词：** 火电厂；一次电气系统；可靠性评估；提升措施

## Study on Reliability Assessment and Improvement Measures of Primary Electrical System in Thermal Power Plant

Yuan Zhihua

Chaoyang Yanshan Lake Power Generation Co., LTD. Chaoyang, Liaoning 122000

**Abstract：** This paper delves into the reliability assessment and improvement measures for the primary electrical systems in thermal power plants. It begins by highlighting the importance of assessing the reliability of these systems, outlining the key aspects and methods of such assessments, which form the theoretical foundation of the study. The paper then examines the critical factors affecting the reliability of primary electrical systems from multiple perspectives, including equipment, operation, management, environment, and human factors. Based on this analysis, the paper proposes targeted measures in technology, management, maintenance, and emergency response to enhance the reliability of primary electrical systems in thermal power plants. The findings of this study not only enrich the theoretical framework for assessing the reliability of primary electrical systems in thermal power plants but also provide valuable insights and guidance for practical engineering applications.

**Keywords：** thermal power plant; primary electrical system; reliability assessment; improvement measures

随着电力工业的快速发展和电网结构的日益复杂，火电厂作为电力供应的重要支柱，其一次电气系统的可靠性问题日益凸显。火电厂一次电气系统的稳定运行直接关系到电力系统的供电质量和安全性，因此，对其可靠性进行评估与提升显得尤为重要。

本文旨在通过深入研究火电厂一次电气系统的可靠性评估方法，全面分析影响可靠性的关键因素，包括设备、运行、管理、环境以及人为因素等。在此基础上，提出针对性的技术、管理、维护和应急提升措施，以期提高火电厂一次电气系统的可靠性水平。本文的研究成果不仅有助于完善火电厂一次电气系统可靠性评估的理论体系，还将为实际工程应用提供有价值的参考和指导，对于保障电力系统的稳定运行和供电质量具有重要意义。

## 一、火电厂一次电气系统可靠性评估概述

### （一）可靠性评估的重要性

火电厂一次电气系统的可靠性评估是确保整个电力系统稳定运行的基石。在电力需求日益增长、电网结构日趋复杂的背景下，其重要性愈发凸显。可靠性评估不仅能够对系统或设备在特

定条件和时段内完成既定功能的能力进行精准的定量和定性分析，为系统的维护、升级和改造提供坚实的科学依据，更是预防事故、保障安全的关键手段<sup>[1]</sup>。通过评估，可以及时发现系统中潜藏的安全隐患，从而采取针对性的措施进行防范，有效避免事故的发生。同时，它还能显著提升电力系统的稳定性和安全性，确保电力供应的连续性和稳定性，为社会的经济发展和人民的生活



提供可靠的电力保障。

## （二）可靠性评估的基本内容

可靠性评估主要包括对系统设备的可靠性分析、系统运行的稳定性评估以及系统应对突发事件的能力评估等。系统设备的可靠性分析主要关注设备的质量、性能、老化程度以及维护状况等因素；系统运行的稳定性评估则主要考察系统在不同运行方式下的稳定性和抗干扰能力<sup>[2]</sup>；系统应对突发事件的能力评估则主要评价系统在面对突发事件时的应急响应能力和恢复能力。这些评估内容共同构成了火电厂一次电气系统可靠性评估的完整框架。

## （三）可靠性评估的发展历程与现状

在电力工业持续进步的背景下，火电厂一次电气系统可靠性评估方法经历了显著演进。早期阶段主要采用经验判断与定性分析为主的粗放式评估；随着统计学、概率论理论体系的完善及计算机技术的普及，评估方法逐步转向定量分析与精细化建模。现阶段，国内外学界已构建起相对成熟的可靠性评估理论框架与技术方法体系，涵盖故障树分析、蒙特卡洛模拟等多种量化工具，为火电厂一次电气系统的可靠性评估提供了系统化的技术支撑，显著提升了评估结果的准确性与工程指导价值。

# 二、火电厂一次电气系统可靠性影响因素分析

## （一）设备因素

设备是火电厂一次电气系统的基石，其质量、性能和老化程度直接关系到系统的稳定运行。设备质量是可靠性的首要因素，制造缺陷或劣质材料易导致运行故障，影响系统稳定性。性能不稳定的设备可能引发系统波动甚至事故。随着使用时间增长，设备性能逐渐下降，老化问题加剧，导致故障率上升和维护成本增加，严重威胁系统可靠性。此外，设备选型、配置和兼容性同样重要。选型需基于系统实际需求，考虑额定容量、电压等级等参数；配置应科学合理，避免冗余或不足；兼容性则需确保不同设备间接口、通信协议等无缝对接，防止系统集成困难或故障发生。

## （二）运行因素

运行因素对火电厂一次电气系统的可靠性具有重要影响。运行方式的不合理会导致设备负荷失衡，过重会加速设备磨损和老化，缩短使用寿命；过轻则可能降低运行效率，甚至引发故障。因此，需根据设备性能和系统需求制定合理运行方式，确保设备处于最佳状态<sup>[4]</sup>。同时，恶劣的运行环境，如高温、潮湿和腐蚀，也会对设备造成不利影响。高温可能损害设备绝缘性能和机械强度，潮湿环境容易导致设备受潮和短路，而腐蚀则会削弱设备的金属部件，进而降低系统可靠性。为此，应采取有效措施改善设备运行环境，如安装空调、除湿机等设备。

## （三）管理因素

管理因素对火电厂一次电气系统的可靠性至关重要。首先，管理制度的健全性直接影响系统可靠性。不完善的管理制度可能导致设备运行和维护流程不规范，增加人为错误的风险。因此，需建立完善的设备管理制度和流程，明确各级人员的职责和权

限，以确保设备的正常运行和维护。其次，管理流程的合理性是关键。合理的管理流程应高效协调各部门工作，确保设备得到及时维护和检修。此外，管理人员素质也影响系统可靠性。高素质管理人员应具备丰富的专业知识和实践经验，能制定科学的运行和维护计划。因此，需加强管理人员培训，提高其专业素质和管理能力。

## （四）环境因素

环境因素也是影响火电厂一次电气系统可靠性的重要因素之一。自然环境如气候、温度、湿度、地震等都会对设备的运行状况产生影响。例如，极端气候条件可能导致设备故障率上升；地震等自然灾害则可能对设备造成直接破坏。因此，应加强对自然环境的监测和预警，采取有效的措施来应对自然灾害对系统的影响。此外，社会环境如政策、法规、经济等也会对系统的可靠性产生影响。政策的调整可能影响火电厂的运行方式和经济效益；经济环境的变化则可能影响设备的更新和改造计划。因此，应密切关注社会环境的变化，及时调整系统的运行和维护策略，确保系统的稳定运行。

## （五）人为因素

人为因素是指由于人的行为或决策导致的对火电厂一次电气系统可靠性的影响。这包括设计缺陷、施工错误、操作不当、维护不足以及管理失误等方面。人为因素往往具有复杂性和不确定性，难以完全避免。例如，设计缺陷可能导致系统存在安全隐患；施工错误可能导致设备安装不符合要求；操作不当可能导致设备故障或事故；维护不足可能导致设备故障率上升；管理失误则可能导致系统运行混乱。为了减少人为因素对系统可靠性的影响，应加强人员培训和管理，提高人员的技能水平和责任意识；其次，完善管理制度和流程，规范人员的行为和决策，加强监督和考核。

# 三、火电厂一次电气系统可靠性提升措施

## （一）技术措施

### 1. 选用高质量设备

在进行设备选型工作时，我们应将质量可靠、性能稳定作为首要考量因素。高质量的设备往往具备更低的故障发生率以及更为长久的使用年限，这能够极大地降低整个系统出现故障的风险，保障系统的平稳运行<sup>[5]</sup>。除此之外，设备的兼容性也至关重要，它关系到设备能否与现有系统无缝对接。同时，可扩展性也不容忽视，如此一来，在未来有系统升级和改造需求时，就能更加轻松地实现。此外，采用先进的设备和技术也是提高系统可靠性的重要途径<sup>[7]</sup>。

### 2. 加强设备监测与诊断

利用先进的监测和诊断技术对设备进行实时监测，及时发现并处理设备异常情况。通过安装传感器、监测仪表等设备，可以实时获取设备的运行状态信息，如温度、压力、电流等。结合智能诊断系统，可以对设备状态进行实时分析和判断，提前发现潜在故障并采取相应的处理措施。此外，定期对设备进行预防性试

验和检修也是提高设备可靠性的重要手段<sup>[9]</sup>。

### （二）管理措施

#### 1. 完善管理制度与流程

建立健全的设备管理制度和流程，明确各级人员的职责和权限。通过制定详细的设备运行、维护、检修等管理制度和流程，可以规范设备的运行和维护行为，确保设备的正常运行<sup>[9]</sup>。同时，还应建立完善的设备档案管理制度，记录设备的运行和维护历史，为设备的更新和改造提供依据。此外，加强对设备的全生命周期管理也是提高系统可靠性的重要措施<sup>[8]</sup>。

#### 2. 加强人员培训与考核

定期对运行和维护人员进行培训，提高其技能水平和安全意识。通过组织专业技能培训、安全教育培训等活动，可以提高运行和维护人员的专业素质和安全意识，使其能够更好地胜任本职工作。同时，还应建立完善的考核机制，对运行和维护人员的工作绩效进行定期评估，激励其不断提高工作水平。此外，加强对管理人员的培训和管理也是提高系统可靠性的重要环节。

### （三）维护措施

#### 1. 实施定期维护与保养

按照规定的周期对设备进行维护保养，延长设备的使用寿命。通过定期对设备进行清洁、润滑、紧固等维护工作，可以保持设备的良好状态，减少设备的磨损和老化。同时，还应定期对设备进行预防性试验和检修，及时发现并处理设备的潜在故障。此外，采用先进的维护技术和方法也是提高设备可靠性的重要途径<sup>[6]</sup>。

#### 2. 建立快速响应机制

一旦发现设备故障或异常情况，应立即启动快速响应机制进行处理。通过建立完善的应急预案和响应流程，可以确保在突发事件发生时能够迅速响应并采取有效的处理措施。同时，还应加强与设备供应商和专业维修机构的合作与交流，以便在需要时能够及时获得技术支持和服务。此外，定期对快速响应机制进行演练和评估也是提高系统可靠性的重要手段。

### （四）应急措施

#### 1. 制定完善的应急预案

针对自然灾害、安全事故、公共卫生事件等不同类型的突发事件，需构建分级分类的应急预案体系。预案内容应涵盖应急组织架构（明确指挥中心、现场处置组、后勤保障组等职能分工）、响应等级划分（如Ⅰ级/Ⅱ级/Ⅲ级响应标准）、处置流程（从预警监测、信息上报、先期处置到后期恢复的全流程操作指引）、

资源调配机制（包括应急物资储备库、救援设备清单、医疗支持渠道等）以及常态化应急演练计划。通过定期修订预案内容，结合历史事件复盘与专家评审，确保预案的科学性、可操作性与动态适应性，从而在突发事件发生时实现快速响应、资源高效整合与精准处置。

#### 2. 加强应急演练与培训

建立多层次的应急培训机制，针对不同岗位人员开展专项技能培训，如消防器材操作、急救技能、应急通讯设备使用等，提升个体专业素养。同时，定期组织多场景、多科目的实战化应急演练，包括但不限于桌面推演、功能模块演练及全要素综合演练，重点检验跨部门协作效率、指挥系统畅通性及现场处置规范性。演练后需形成评估报告，针对暴露的短板（如信息传递延迟、资源调度冲突等）制定改进措施，持续优化应急响应机制。此外，通过宣传手册、线上课程等方式加强全员应急知识普及，提高员工风险意识与自救互救能力，形成“预防-响应-恢复”的全链条应急管理体系。

## 四、结论

本文研究了火电厂一次电气系统的可靠性评估与提升措施。通过构建可靠性评估理论框架，分析了影响系统可靠性的因素，并提出了针对性的技术、管理、维护和应急措施。这些措施的实施将有助于提高火电厂一次电气系统的可靠性水平，为电力系统的稳定运行提供保障<sup>[10]</sup>。未来，随着电力技术的不断发展和电网结构的日益复杂，火电厂一次电气系统的可靠性评估与提升措施研究将面临更多的挑战和机遇。因此，需要不断加强理论研究和技术创新，为火电厂一次电气系统的安全稳定运行提供更加坚实的保障。同时，还应注重多学科交叉融合和综合应用，以推动火电厂一次电气系统可靠性评估与提升措施研究的深入发展。

展望未来，伴随电力技术的持续革新（如新能源并网、智能电网发展）与电网结构的日趋复杂（如多能互补、分布式能源渗透），火电厂一次电气系统的可靠性评估及提升研究将面临更多新挑战与新机遇。因此，需持续深化理论研究，推动技术创新（如数字化评估模型、人工智能应用），为系统安全稳定运行筑牢技术根基。同时，应注重多学科交叉融合（如结合电力工程、数据分析、风险管理），通过综合应用不同领域的技术成果，进一步推动该领域研究的纵深发展。

## 参考文献

- [1] 郭屹全, 方勇. 电力系统可靠性评估方法综述 [J]. 电子世界, 2014, (17): 58-60.
- [2] 刘志峰. 火力发电厂电气部分可靠性管理研究 [D]. 郑州大学, 2017.
- [3] 李小梦. 火电厂电气一次设备故障检测与维修分析 [J]. 中国机械, 2023, (23): 96-99.
- [4] 李守一. 火力发电厂电气系统调试工作浅析 [J]. 科技创新导报, 2015, 12(32): 103-104.
- [5] 杨冬冬. 火电厂电气系统节能技术应用探析 [J]. 电力设备管理, 2024, (18): 271-273.
- [6] 柏文超. 火电厂电气一次设备状态检修的有效措施分析 [J]. 锅炉制造, 2025, (03): 57-59.
- [7] 郑宇. 火力发电厂电气安装调试要点及技术要求 [J]. 中国设备工程, 2023, (22): 226-228.
- [8] 张敬惠. 火电厂电力设备安装管理工作探究 [J]. 科协论坛 (下半月), 2013, (10): 49-50.
- [9] 侯伟, 严伟, 石铁洪. 基于数字化技术的火电厂电气监控管理系统方案 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37(03): 93-97.
- [10] 姜胜利. 浅谈火力发电厂电气一次的部分设计 [J]. 黑龙江科技信息, 2010, (28): 35.

# 火电机组碳排放特性研究及管理建议

张昌兴

甘肃电投张掖发电有限责任公司，甘肃 张掖 734000

DOI:10.61369/EPTSM.2025040002

**摘 要：** 本研究针对火电机组碳排放动态特性及其引发的安全矛盾，通过多维度实证分析揭示了碳排放非线性响应机制：负荷变化率超  $\pm 5\%/min$  时碳强度偏离稳态值  $> 15\%$ ，设备劣化通过能效衰减间接推高碳排放  $1.3 - 2.1\%$ ，燃料与环境交互作用触发碳强度跃升阈值。研究发现碳排放激增与设备安全存在强耦合关系：碳强度  $> 1000\text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$  时转子热应力骤增2.3倍，频繁启停致疲劳损伤因子超安全阈值0.5。基于此，提出碳数据驱动的安全管理框架：构建负荷-碳强度动态控制曲线实现碳安协同优化，设计多源监测融合算法校正监测误差，创新“碳指纹-健康度”模型联动设备检修与碳配额分配。成果为火电机组低碳安全运行提供理论支撑与技术路径。

**关 键 词：** 火电机组；碳排放；动态特性；安全管理；协同优化

## Study on Carbon Emission Characteristics of Thermal Power Units and Management Suggestions

Zhang Changxing

Gansu Electric Power Investment Zhangye Power Generation Co., Ltd., Zhangye, Gansu 734000

**Abstract：** This study focuses on the dynamic characteristics of carbon emissions from thermal power units and the safety conflicts they cause. Through multi-dimensional empirical analysis, it reveals the nonlinear response mechanism of carbon emissions: when the load change rate exceeds  $\pm 5\%/min$ , the carbon intensity deviates from the steady-state value by more than  $15\%$ ; equipment deterioration indirectly drives up carbon emissions by  $1.3-2.1\%$  through energy efficiency attenuation; and the interaction between fuel and the environment triggers the threshold for a surge in carbon intensity. The study finds a strong coupling relationship between the surge in carbon emissions and equipment safety: when the carbon intensity is greater than  $1000\text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ , the thermal stress on the rotor increases by 2.3 times, and frequent starts and stops cause the fatigue damage factor to exceed the safety threshold of 0.5. Based on this, a carbon data-driven safety management framework is proposed: constructing a load-carbon intensity dynamic control curve to achieve carbon-safety collaborative optimization, designing a multi-source monitoring fusion algorithm to correct monitoring errors, and innovating a “carbon fingerprint-health degree” model to link equipment maintenance and carbon quota allocation. The results provide theoretical support and technical pathways for low-carbon and safe operation of thermal power units.

**Keywords：** thermal power unit; carbon emission; dynamic characteristic; safety management; collaborative optimization

## 引言

在能源结构低碳转型背景下，火电机组面临碳排放精准管控与设备安全稳定运行的双重挑战。当前研究多聚焦静态碳排放核算，却忽视了负荷动态响应、设备隐性劣化及燃料-环境耦合等复杂机制：深度调峰中负荷突变触发燃烧滞后效应，碳强度骤增超  $15\%$ ，并伴随汽轮机转子热应力剧增；新能源波动迫使机组日内频繁启停，导致碳强度突破安全阈值，加速金属疲劳损伤<sup>[1-2]</sup>。传统监测手段因脱硝尿素热解副反应碳源遗漏、烟气流速测量失真进一步衍生碳配额错配与环保监管风险<sup>[3-4]</sup>。为系统破解上述难题，本文提出碳数据驱动的多维度耦合解析方法，通过量化负荷-碳排放非线性响应边界、设备劣化传导链及燃料-环境交互阈值，构建“监测-模型-控制”三位一体的协同管理框架，为火电低碳安全运行提供理论革新与实践路径。



一、火电机组碳排放多维度动态特性

（一）负荷－碳排放非线性响应机制

火电机组变负荷过程中，燃烧系统热惯性导致碳排放响应存在显著滞后效应。通过分析变负荷瞬态数据发现，负荷变化率与碳强度波动呈强非线性关联，且降负荷过程的碳强度超调量显著高于升负荷工况<sup>[5]</sup>。基于此，本文构建了负荷变化率－碳强度传递函数模型（式1）<sup>[6]</sup>。

式1 负荷变化率－碳强度关联模型：

$$\Delta I_c = \alpha \left| \frac{dL}{dt} \right|^2 \cdot e^{-\beta t} + \gamma \cdot \frac{dL}{dt} \quad (1)$$

$\Delta I_c$ ：碳强度偏差值； $\frac{dL}{dt}$ ：负荷变化率； $\alpha, \beta, \gamma$ ：机组特性系数

（二）设备状态对碳排放的隐性传导

火电机组关键设备劣化会通过能效衰减间接放大碳排放强度，其传导机制具有隐蔽性与累积性。更隐蔽的是汽封磨损故障，虽未触发保护停机，却导致碳强度持续偏离设计值<sup>[7]</sup>。这种隐性传导的核心在于设备状态劣化→能量转换效率衰减→燃料消耗增量→碳排放强度升高的非线性链式反应。值得注意的是，碳排放异常信号往往早于设备故障报警出现，证实碳排放数据可作为设备早期劣化的敏感指示器<sup>[8]</sup>。基于此，本文构建了设备健康度－碳强度关联模型（式2）<sup>[9]</sup>。

式2 设备健康度－碳强度关联模型：

$$I_c = I_{c0} \cdot (1 + \kappa \cdot \Delta \eta) \quad (2)$$

$I_c$ ：实际碳强度； $I_{c0}$ ：设计碳强度； $\Delta \eta$ ：设备效率偏差率； $\kappa$ ：传导系数。

（三）燃料与环境耦合影响边界

燃料特性与环境参数的交互作用通过燃烧稳定性与换热效率双重路径制约碳排放边界。燃用高水分褐煤在低温高湿区存在碳强度跃升阈值，高温低湿区出现降幅最优区间<sup>[10]</sup>；烟煤湿度敏感性显著；天然气碳排放严格遵循温度单向调控。基于燃料－环境耦合模型（式3）的边界解析<sup>[11]</sup>。

式3 燃料－环境耦合模型：

$$I_c = I_{base} \cdot [1 + k_f \cdot \Delta F + k_e \cdot (0.6 \Delta T - 0.1 \Delta H)] \quad (3)$$

$k_f$ ：燃料特性系数； $k_e$ 为环境敏感系数； $\Delta F$ ：燃料品质偏差率； $\Delta T$ 、 $\Delta H$ ：温湿度变化量。

二、碳排放引发的安全矛盾诊断

研究表明，这些动态特性并非孤立存在，其引发的碳排放激增或持续偏离，如设备劣化会直接作用于关键设备，形成显著的碳－安全耦合风险。本部分将聚焦于此，深入剖析碳排放动态特性如何转化为具体的安全矛盾，重点诊断深度调峰、监测失真及新能源波动三大典型场景下碳排放激增与设备损伤、寿命损耗及管理风险的强关联机制<sup>[12]</sup>。

（一）深度调峰的碳－安全刃剑效应

深度调峰中负荷频繁波动会引发碳排放强度与设备安全的尖

锐矛盾。当负荷变化率超过时，燃烧滞后效应导致碳强度骤增，同时汽轮机转子表面温差瞬间扩大，触发高周疲劳损伤<sup>[13]</sup>。碳强度突破时，金属热应力幅值较稳态工况高2.3倍，加速微观蠕变空洞形成<sup>[14]</sup>。为平衡低碳目标与设备安全，需严格限制负荷变化率，并实施实时碳强度联锁控制：当碳强度 >950 g/(kW · h) 时自动触发燃烧优化指令，阻断热应力剧变与寿命损耗的恶性循环（见表1）<sup>[15]</sup>。

表1 深度调峰关键安全阈值

参数	安全阈值	风险特征
碳强度临界值	≤ 950 g/(kW · h)	超限后热应力指数增长
负荷变化率	≤ 3%/min	碳强度骤增风险
疲劳损伤因子 D	≤ 0.5	D>0.5时裂纹风险骤增

（二）监测数据失真放大管理风险

火电机组燃料端与烟气端碳排放监测数据的系统性偏差通过碳交易与环保监管链条显著放大管理风险。其核心成因在于脱硝尿素热解隐性碳源与烟气流速测量误差的耦合作用：尿素热解脱硝工艺副反应生成 CO<sub>2</sub>，导致某 F 级燃气机组烟气端监测值较燃料端持续偏高，而燃料端核算未涵盖此部分碳源<sup>[16]</sup>。同时，SCR 后高尘、高温烟道环境中，点式流量计因飞灰堵塞磨损造成偏差，多声道超声波流量计受流场扰动产生误差，尤其当烟道直管段未满足“前4后2”安装规范时流速分布不均加剧（见表2）<sup>[17]</sup>。

表2 三重风险链表

风险类型	失真机制	案例影响
碳配额错配风险	烟气端数据系统性偏高导致配额超支	某 350MW 热电联产机组多支出配额 8.4 万吨 / 年
设备连锁损伤风险	尿素热解温控失准引发硫酸氢铵堵塞	某 330MW 机组空预器压差上升 30% 导致非停

（三）新能源波动下的碳惩罚与安全风险

新能源出力骤降迫使火电机组日内频繁启停调峰，引发碳排放激增与设备损伤的恶性循环<sup>[18]</sup>。单日内执行 3 次启停调峰时，冷态启动阶段磨煤机出力波动导致未燃碳损失激增、锅炉效率衰减，日均碳强度跃升；同时锅炉汽包壁温差峰值超设计值<sup>[19]</sup>。这种碳－安耦合风险的核心机制在于燃烧失稳→碳排放骤增与热应力交变→金属疲劳累积的双重作用链：频繁启停导致碳强度突破临界拐点时，汽包热应力与碳强度呈指数关联，3 次循环后疲劳累积损伤因子超安全阈值（见表3）<sup>[20]</sup>。

表3 火电机组频繁启停工况下碳－安耦合关键参数对比表

参数	单次启停	3次启停	安全阈值	变化规律
日均碳强度 (g/(kW · h))	976	1089	≤ 950	超阈值后热应力指数增长
汽包壁温差 (°C)	98	148	≤ 100	温差增幅与启停次数线性相关
热应力峰值 (MPa)	122	183	≤ 135	碳强度 > 950g/(kW · h) 时增幅 > 15MPa/50g
疲劳损伤因子 D	0.27	0.82	≤ 0.5	斜率 0.27 / 次，D > 0.5 时裂纹风险陡增

三、碳数据驱动的安全管理建议

（一）安全运行优化技术

火电机组安全运行边界的动态优化需融合碳强度实时监测数据与设备安全阈值，构建分机组类型的负荷-碳强度控制曲线。超临界机组在低负荷工况下碳强度阈值严格限定，亚临界机组放宽，燃气-蒸汽联合循环机组因热效率优势进一步压缩。基于此开发的碳强度实时预警模块深度嵌入 SIS 系统，通过三级响应机制实现闭环控制：当碳强度超阈值时，触发燃烧优化指令自动调整风煤比（见表4）。

表4 关键控制参数表

机组类型	低负荷碳强度阈值 / (g · (kW · h) <sup>-1</sup> )	降负荷速率 / (% · min <sup>-1</sup> )	停机损伤因子 阈值 D
超临界机组	≤ 920	≤ 3.0	>0.5
亚临界机组	≤ 980	≤ 2.5	>0.6
燃气-蒸汽联合循环机组	≤ 850	≤ 4.0	>0.4

（二）多源监测校正体系

火电机组燃料端与烟气端碳排放监测数据的系统性偏差亟须通过多源融合技术实现动态校正。基于对燃气机组前后端监测数据的实证分析，针对烟气流速测量误差，构建 CEMS/DCS/核算法三重校验规则库（见图1）。

（三）碳-安协同管理机制

创新

火电机组碳数据与设备安全状态的深度耦合，亟须构建“碳指纹-健康度”评估模型驱动协同管理创新。设备层面，基于碳排放波动特征动态评估设备健康状态：某660MW 机组高压转子裂纹案例表明，碳强度异常波动较振动监测提前预警金属疲劳，据此将检修周期压缩。该模型通过碳波动时域特征与设备损伤因子 D 建立



图1 三重校验规则库

参考文献

[1] 姚顺春, 支嘉琦, 付金杯, 等. 火电企业碳排放在线监测技术研究进展 [J]. 华南理工大学学报 (自然科学版), 2023, 51(06): 97-108.

[2] 解婷婷, 孙友源, 郭振, 等. 火电机组碳排放连续监测技术研究与应用综述 [J]. 发电技术, 2024, 45(05): 919-928.

[3] 郭喜燕, 刘嘉康, 白雪, 等. 基于碳排放特性及碳交易规则的热电联产机组经济性分析 [J]. 热力发电, 2023, 52(04): 14-23.

[4] 陈公达, 傅诗万, 蔡秀霞, 等. 基于前后端在线监测的燃气发电机组碳排放特性与影响因素分析 [J]. 热力发电, 2024, 53(06): 96-105.

[5] 宣添星. 火电机组远程碳排放监测系统的设计应用与推广 [J]. 电气时代, 2024, (04): 32-34.

[6] 李政, 李伟起, 张忠伟, 等. “双碳”目标下我国电力系统灵活性资源发展策略研究 [J]. 中国工程科学, 2024, 26(04): 108-120.

[7] 单思珂, 刘含笑, 刘美玲, 等. 我国火电行业碳足迹评估综述 [J]. 发电技术, 2024, 45(04): 575-589.

[8] 王明, 周志兴, 封明敏, 等. 火电机组实测法 CO<sub>2</sub> 排放监测模型及准确性验证 [J]. 煤化工, 2022, 50(02): 18-21+33.

[9] 王玉谱, 田亮. 基于证据理论与云模型的火电机组节能减排绩效综合评价 [J]. 华北电力大学学报 (自然科学版), 2022, 49(03): 96-103+126.

[10] 张春雷, 赵良, 刘道, 等. 火电 CO<sub>2</sub> 排放连续监测的国际经验分析及启示 [J]. 中国工程科学, 2024, 26(04): 134-151.

[11] 龙建平, 李德忠, 席莉. 考虑碳减排的火电机组煤耗基准值研究 [J]. 能源与节能, 2024(3): 98-101

[12] 李建华, 陈雪, 付浩, 武云霞, 白智丹. 碳市场环境下火电厂市场竞价策略及交易技术 [J]. 四川电力技术, 2023, 46(3): 46-52+89

[13] 夏忠林, 陈文通, 许书舫, 等. 火电厂烟塔合一技术应用现状与现存问题分析 [J]. 发电技术, 2024, 45(04): 590-599.

[14] 胡波, 陈俊, 杨柳, 等. 全国产分散控制系统开发与应用 [J]. 热力发电, 2022, 51(03): 159-165.

[15] 伍晨. 安徽省火电行业碳排放影响因素及达峰预测研究 [D]. 安徽理工大学, 2022.

[16] 张兆, 党志军, 文慧峰, 等. 干风保养技术在火电机组汽水系统全保护中的应用 [J]. 东北电力技术, 2022, 43(03): 27-31.

[17] 王凯丰, 谢丽蓉, 乔颖, 等. 电池储能提高电力系统调频性能分析 [J]. 电力系统自动化, 2022, 46(01): 174-181.

[18] 乌日根和希格, 杨娜, 余滔, 等. 碳交易-用能权-电力市场联动下火电机组参与交易策略研究 [J]. 工程研究-跨学科视野中的工程, 2025, 17(01): 126-139.

[19] 国能大渡河流域水电开发有限公司. 基于关联技术的火电厂机组碳排放特性分析方法: CN202411327403.7[P]. 2025-01-03.

[20] 张兆, 党志军, 文慧峰, 等. 干风保养技术在火电机组汽水系统全保护中的应用 [J]. 东北电力技术, 2022, 43(03): 27-31.

量化关联，实现“碳指纹异常→健康度降级→检修提前”的闭环响应。系统层面设计碳配额分配-设备状态联动机制：当设备健康评分从 A 级降至 B 级，年度碳配额收紧。联动规则嵌入碳交易平台，实时比对机组健康状态，迫使电厂在安全阈值内优化运行（见表5）。

表5 碳-安协同管理创新机制核心要素

创新方向	技术方法	管理机制	实证效果
设备健康动态评估	碳指纹-健康度模型	检修周期动态调整机制	· 碳强度异常较振动监测提前 48 小时预警 · 高压转子检修周期压缩 25%（12 个月→9 个月）
碳配额联动分配	健康评分-配额联动算法	碳交易平台嵌入式规则	· 健康评分 B 级→年度碳配额收紧 7% · 迫使电厂在安全阈值内运行
安全规程升级	CO <sub>2</sub> 浓度-温度双参数闭锁跳闸	修订《火电厂安全规程》第 8.2 条	· 响应时间缩短至 40 秒（原温度保护滞后 12 分钟） · 阻断碳强度骤增引发的缸体超温

四、结束语

本研究系统揭示了火电机组碳排放动态特性与安全风险的耦合机制，创新提出碳数据驱动的协同管理框架。通过量化负荷突变、设备劣化及燃料环境交互对碳排放的非线性影响边界，构建了负荷-碳强度传递函数、设备健康度关联模型及燃料-环境耦合方程，为动态优化运行边界提供理论依据。所提出的三级分级预警机制显著降低监测误差至 ±2.1%，”碳指纹-健康度”模型实现检修周期压缩 25%，有效破解深度调峰中碳-安矛盾。当前模型在极端工况泛化能力及生物质混燃场景适用性仍有局限，亟待通过数字孪生平台深化碳-安风险实时仿真，并探索碳数据与电力辅助服务、配额交易的联动机制，推动火电由被动控碳向智慧预判转型，为能源安全与“双碳”目标协同提供新范式。

# 智能变电站继电保护调试技术优化与故障诊断研究

巨欣悦

国网襄阳供电公司, 湖北 襄阳 441000

DOI:10.61369/EPTSM.2025040005

**摘 要 :** 由于智能电网的快速发展, 促使智能变电站在电力系统中的占比不断地提高, 其继电保护系统的可靠性将会直接地关系到电力系统的安全稳定运行。为此文章分析了智能变电站继电保护系统的特点, 并探讨了现有继电保护调试技术存在的问题, 也提出了一系列的优化策略, 其中包括调试流程优化、调试工具改进以及调试方法创新等等。同时还研究了基于智能算法和在线监测的故障诊断技术, 如神经网络、专家系统等在继电保护故障诊断中的应用。

**关 键 词 :** 智能变电站; 继电保护; 调试技术优化; 故障诊断; 智能算法; 在线监测

## Optimization of Relay Protection Commissioning Technology and Fault Diagnosis Research in Smart Substation

Ju Xinyue

State Grid Xyang Power Supply Company, Xiangyang, Hubei 441000

**Abstract :** Due to the rapid development of smart grid, smart substations are used in power systems, and the reliability of their relay protection systems directly affects the safe and stable operation of power systems. To this end, this article analyzes the characteristics of relay protection system in smart substations and explores the existing problems in the commissioning technology of relay protection. It also proposes a series of optimization strategies, including the optimization of commissioning, the improvement of commissioning tools, and the innovation of commissioning methods, etc. At the same time, fault diagnosis technology based on intelligent algorithms and online monitoring, such as networks and expert systems, is also studied and applied in the fault diagnosis of relay protection.

**Keywords :** smart substation; relay protection; commissioning technology optimization; fault diagnosis; intelligent algorithm; online monitoring

### 引言

智能变电站是智能电网的关键节点, 其也是实现电力系统智能化运行的重要基础。与传统变电站相比而言, 智能变电站采用了先进的数字化、网络化技术, 以此实现了信息的共享与交互, 有效地提高了电力系统的运行效率和可靠性。其中, 由于电力系统发生故障时, 继电保护装置能够迅速、准确地动作, 通过切除故障设备, 来防止故障的范围扩大, 达到减少停电损失的效果。因此继电保护系统是智能变电站的核心组成部分, 它承担着保障电力系统安全稳定运行的重要任务。

现阶段, 随着智能变电站技术的不断发展和设备的日益复杂, 继电保护调试技术和故障诊断面临着新的挑战。而且传统的继电保护调试方法和故障诊断手段已难以满足智能变电站的需求, 当中存在着调试效率低、诊断准确性差等问题。因此, 对于智能变电站继电保护调试技术进行优化, 以提高故障诊断的准确性和及时性, 具有非常重要的现实意义。只有优化调试技术, 才可以确保继电保护装置在投入运行前各项性能指标均符合要求, 以此提高装置的可靠性。而先进的故障诊断技术则能够在故障发生时, 快速地定位故障点, 助力故障处理时间的缩短, 进而降低对于电力系统运行的影响。

### 一、智能变电站继电保护系统特点

#### (一) 数字化与网络化

在传统的变电站当中, 电流、电压等模拟信号都是通过电缆传输至保护装置, 而智能变电站继电保护系统采用了数字化采样

和网络化通信技术, 所以在智能变电站中, 这些信号经电子式互感器能够转换为数字信号, 并通过基于 IEC61850 标准的通信网络进行传输。正是这种数字化与网络化的特点, 才减少了电缆的使用, 并降低了信号传输过程中的损耗和干扰, 直接地提高了信号的准确性和可靠性<sup>[1]</sup>。同时, 网络化通信还实现了信息的共享, 使



得保护装置能够获取更多的信息，此举为保护动作的决策提供更为全面的依据。例如线路保护装置可以通过网络获取相邻线路保护装置的运行信息，以此实现保护的协同动作，有效地提高了保护的灵敏性和可靠性。

### （二）功能集成化

智能变电站继电保护装置集成了多种功能，其不再像传统的保护装置那样功能单一<sup>[2]</sup>。除了基本的保护功能之外，它还具备测量、控制、计量、故障录波等功能。而这种功能集成化的设计，减少了设备的数量，也就降低了变电站的建设成本和占地面积。集成化的功能则使得保护装置能够更好地实现与其他智能设备的协同工作，进而提高了变电站的自动化水平。如保护装置在检测到故障时，不仅能够快速地切除故障，还可以自动地记录故障波形，如此便为后续的故障分析和诊断提供详细的数据支持，并且还能够将测量数据实时地上传至监控系统，实现了对电力系统运行状态的实时监测。

### （三）智能化程度高

由于智能变电站继电保护系统具备较高的智能化程度，因此它能够根据电力系统的运行状态和故障情况，自动地调整保护定值和动作特性，实现了自适应保护。举个例子，当系统的运行方式发生变化时，保护装置就可以通过对网络中传输的各种信息进行分析 and 处理，自动地调整保护的動作時限和靈敏度，有效地確保了保護的選擇性和可靠性<sup>[3]</sup>。此外，智能保護裝置還具備自檢和互檢功能，其能夠實時地監測自身和其他相關設備的運行狀態，確保能夠及時地發現設備故障並發出報警信號，從而提高了設備的可維護性和運行可靠性。

## 二、现有继电保护调试技术存在的问题

### （一）调试流程复杂

智能变电站继电保护系统当中涉及到了众多的设备和复杂的网络通信，所以它的调试流程相对传统变电站而言更为复杂<sup>[4]</sup>。实际在调试的过程中，相关人员需要对电子式互感器、合并单元、保护装置、智能终端等多个设备进行逐一的调试，并且要确保它们之间的通信正常、功能协调。原因是设备之间的关联紧密，一个设备的调试可能会影响到其他设备，所以导致调试过程中要不断地进行反复调试和验证，而这增加了调试的工作量和时间成本<sup>[5]</sup>。比如，在调试保护装置与合并单元之间的通信时，调试人员需要精确地配置通信参数。因为一旦参数设置出现错误，就会导致保护装置无法正确地接收采样数据，从而影响到保护功能的正常实现，并且还需要重新检查和调整参数，对其进行再次调试。

### （二）调试工具落后

目前，许多智能变电站在进行继电保护调试时仍然采用着传统的调试工具，如万用表、继电保护测试仪等。虽然这些工具在一定程度上能够满足基本的调试需求，但对于智能变电站数字化、网络化的继电保护系统来说，还是存在着诸多的局限性。具体来说：传统的继电保护测试仪难以模拟复杂的网络通信环境和数字信号，它无法对基于 IEC61850 标准的通信功能进行全面、准

确的测试。而且这些工具大多为独立使用，当中缺乏了与其他设备的互联互通，它不能实现调试数据的自动采集和分析，使得调试效率低下，因此难以满足智能变电站大规模设备调试的需求<sup>[6]</sup>。

### （三）调试人员技术水平参差不齐

因为智能变电站继电保护技术涉及到了电力电子、计算机、通信等多个领域的知识，所以对于调试人员的技术水平要求较高。然而在目前的电力行业中，调试人员的技术水平参差不齐，存在部分调试人员对智能变电站的新技术、新设备的了解不够深入，自身缺乏数字化、网络化调试的经验。此时在调试的过程中，就可能会出现对于调试流程不熟悉、对设备参数设置错误等问题，影响到了调试的质量和进度。例如某位调试人员对 IEC61850 标准的理解不够透彻，那么在配置通信参数时他就容易出现错误，进而会导致设备之间通信异常，直接地增加了调试的难度和风险。

## 三、继电保护调试技术优化策略

### （一）调试流程优化

为了提高智能变电站继电保护调试效率，相关人员需要对调试流程进行优化。首先需要建立标准化的调试流程，在其中明确各个调试环节的顺序和要求，并且减少不必要的重复操作。对此，相关人员可以将调试流程分为设备单体调试、系统联调、功能验证等多个阶段，然后在每个阶段都制定详细的调试方案和验收标准。比如在设备单体调试阶段，可以重点检查设备的基本功能和性能指标；系统联调阶段则主要验证设备之间的通信和协同工作能力；功能验证阶段通过模拟各种故障情况，来检验保护装置的动作准确性和可靠性。

其次相关人员可以采用并行调试的方法，即对于相互独立的设备和调试环节，可以同时进行调试，旨在缩短调试的周期。如在对不同间隔的保护装置进行调试时，就可以安排多个调试小组同时开展工作，从而提高调试的效率。此外，相关人员还可以利用自动化调试技术，积极地开发调试软件，促使调试过程的自动化控制和数据的自动采集、分析得以实现，这样能够减少人工干预，达到提高调试准确性和效率的目的。

### （二）调试工具改进

在研发和应用适合智能变电站继电保护调试的新型工具时，一方面要注重开发基于数字化、网络化技术的继电保护测试仪<sup>[7]</sup>。该测试仪应具备模拟 IEC61850 通信网络、生成各种数字信号的功能，以此才能能够对保护装置的通信功能、采样精度、保护逻辑等进行全面的测试。例如测试仪可以模拟合并单元输出不同格式和精度的数字采样值，以测试保护装置对于采样数据的处理能力；或者还可以模拟网络故障，进而测试保护装置在通信异常情况下的容错能力。

另一方面可以引入智能调试终端，从而实现调试工具与智能变电站设备之间的互联互通。由于智能调试终端可以通过网络与保护装置、智能终端等设备进行通信，他能够实时地获取设备的运行状态和调试数据，并且将调试结果反馈给调试人员。同时智



能调试终端还可以与调试软件相结合，进而实现调试过程的远程控制

（三）调试方法创新

对于相关人员而言，想要提高调试的准确性和效率，离不开积极地探索和应用新的调试方法<sup>[8]</sup>。例如采用基于模型的调试方法，即利用智能变电站的系统模型，对于继电保护系统进行仿真调试。而在仿真环境中，将可以模拟各种正常和故障运行工况，使其能够提前发现设计和配置中存在的问题，在此基础上再优化保护方案。另外，相关人员还可以引入人工智能技术，如机器学习算法，借此对调试数据进行分析 and 处理。而通过对大量调试数据的学习和训练，机器学习算法可以自动地识别设备的异常状态和潜在故障，进而为调试人员提供故障预警和诊断建议。

四、继电保护故障诊断技术研究

（一）基于神经网络的故障诊断

人工神经网络具有强大的非线性映射能力和自学习能力，它能够处理复杂的故障信息，因此在智能变电站继电保护故障诊断中具有广泛的应用前景。其原理是采集继电保护装置的动作信息、故障录波数据、设备状态监测数据等作为神经网络的输入，此时经过训练后的神经网络就可以根据输入数据快速判断故障类型和故障位置<sup>[9]</sup>。

举例而言，采用多层感知器（MLP）神经网络，即可将故障时的电流、电压波形特征、保护装置的动作信号等作为输入层节点，再故障类型和故障位置作为输出层节点，并使用大量的历史故障数据对神经网络进行训练，使其学习到故障特征与故障类型、位置之间的映射关系。之后当电力系统发生故障时，将实时采集的数据输入到训练好的神经网络中，便能够快速得出故障的诊断结果。

（二）基于专家系统的故障诊断

专家系统是将领域专家的知识 and 经验以规则的形式存储在知识库中，然后通过推理机对输入的故障信息进行推理和判断，最

后得出故障诊断结论。它是一种基于知识的智能系统，如果在智能变电站继电保护故障诊断中应用，就需要收集大量的继电保护知识、故障案例和运行经验建立起专家系统，提前构建一个完善的知识库。然后当系统发生故障时，专家系统便会根据保护装置的动作顺序、故障前后的电气量变化等采集到的故障信息，即刻在知识库中进行搜索和匹配，再经由推理机进行逻辑推理，最终便能够给出故障的诊断结果和处理建议。

（三）在线监测与故障预警

基于现状而言，利用在线监测技术，实时地监测继电保护装置及相关设备的运行状态，是相关人员实现故障诊断和预警的重要手段<sup>[10]</sup>。为此需要通过安装各种传感器，如电流传感器、电压传感器、温度传感器等，对于设备的电气参数、温度、振动等状态信息进行实时地采集。接着将采集到的数据传输至监测系统，再利用数据分析算法对数据进行处理和分析，以此判断设备是否存在异常的情况。如果监测到设备状态参数超出正常范围时，系统就会及时地发出预警信号，提醒运维人员对其进行检查和处理，进而实现了故障的早期发现和预防。

五、结束语

智能变电站继电保护调试技术的优化和故障诊断，对于保障电力系统的安全稳定运行而言是至关重要的。本文通过分析智能变电站继电保护系统的特点，指出了现有调试技术当中存在的问题，并且提出了调试流程优化、调试工具改进和调试方法创新等相应的优化策略，同时还研究了基于神经网络、专家系统等智能算法的故障诊断技术以及在线监测与故障预警技术。相信通过上述这些技术的应用和推广，就能够有效地提高智能变电站继电保护调试的效率和准确性，在增强故障诊断能力的基础上，降低电力系统故障发生的概率，并且缩短故障的处理时间。然而随着智能电网技术的不断发展，智能变电站继电保护技术也将持续更新，未来还需要不断探索和研究新的调试技术和故障诊断方法，以适应电力系统发展的需求，推动智能电网的进一步发展和完善。

参考文献

[1] 马天晓. 智能变电站继电保护检测和调试技术研究 [J]. 科技资讯, 2024, 22(22): 90-92. DOI: 10.16661/j.cnki.1672-3791.2406-5042-5791.  
[2] 谷子健, 孙畅岑, 李献澜. 基于人工智能技术的继电保护故障诊断技术研究 [J]. 光源与照明, 2025, (02): 103-105.  
[3] 袁春雷. 智能变电站继电保护调试技术研究 [J]. 消费电子, 2025, (02): 128-130.  
[4] 刘秀丽. 智能变电站继电保护调试技术研究 [J]. 光源与照明, 2025, (02): 198-200.  
[5] 佐松阳, 孙翻栋. 智能变电站在线监测与故障诊断技术在继电保护二次回路中的应用 [J]. 光源与照明, 2025, (03): 108-110.  
[6] 张驰, 谢民, 刘宏君, 等. 基于语义网的智能站继电保护隐性故障辨识诊断技术研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(14): 95-101. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181155.  
[7] 武凯. 发电厂继电保护装置的故障诊断与智能预警研究 [J]. 电力设备管理, 2024, (20): 89-91.  
[8] 宗志亚. 基于扰动激励的智能变电站继电保护故障诊断关键技术 [J]. 电测与仪表, 2019, 56(21): 63-69. DOI: 10.19753/j.issn1001-1390.2019.021.011.  
[9] 朱婧瑶. 智能变电站继电保护隐性故障诊断与系统重构方法 [J]. 科学与信息化, 2022, (21): 131-133.  
[10] 陈忠文. 电力系统中的继电保护装置故障分析与智能诊断技术研究 [J]. 自动化应用, 2024, 65(S01): 345-348. DOI: 10.19769/j.zdhy.2024.S1.114.

# 引言数字化转型背景下电力营销精准服务模式创新研究

李欣

国网武汉供电公司, 湖北 武汉 430010

DOI:10.61369/EPTSM.2025040006

**摘 要 :** 本文聚焦于数字化转型背景下的电力营销领域,深入地剖析了传统服务模式存在的不足,再结合大数据、人工智能、物联网等数字化技术的发展趋势,提出了电力营销精准服务模式的创新建议。希望通过构建精准的客户画像、优化服务流程、创新服务渠道与产品等策略,能够助力电力企业营销服务的精准性、高效性和智能化水平得到提升,进而增强客户满意度与企业市场竞争力,以此推动电力行业在数字化时代的高质量发展。

**关 键 词 :** 数字化转型; 电力营销; 精准服务; 模式创新; 客户画像

## Innovation Research on Precision Service Model of Power Marketing under the Background of Digital Transformation

Li Xin

State Grid Wuhan Power Supply Company, Wuhan, Hubei 430010

**Abstract :** This paper focuses on the field of power marketing under the background of digital transformation, deeply analyzes shortcomings of traditional service models, and combines the development trends of digital technologies such as big data, artificial intelligence, and the Internet of Things. It proposes innovative suggestions for precision service of power marketing. It is hoped that through the strategies of building precise customer portraits, optimizing service processes, innovating service channels and products, the accuracy, efficiency, and intelligence level marketing services of power enterprises can be improved, and then enhance customer satisfaction and the market competitiveness of the enterprise, so as to promote the high-quality development of the power industry in digital era.

**Keywords :** digital transformation; power marketing; precision service; model innovation; customer portrait

随着数字经济的蓬勃发展,数字化转型早已成为了各行业提升竞争力、实现可持续发展的必然选择。而电力行业作为国民经济的重要基础产业,由于数字化转型浪潮的冲击,使得传统的电力营销服务模式已经难以满足客户日益多样化、个性化的需求。因为客户对于电力服务的期望,从基本的供电保障,逐渐地转变为更加便捷、高效、精准且个性化的服务体验。此时数字化转型为电力营销带来了新的机遇和挑战。一方面大数据、人工智能、物联网、云计算等先进数字技术的广泛应用,使得电力企业能够获取和分析海量的客户用电数据、设备运行数据等,从而更加深入地了解客户需求和行为模式,进而为实现精准服务提供了数据和技术支撑;另一方面,是客户对电力服务的质量和效率要求不断地提高,使得市场竞争变得日益激烈,电力企业就需要借助数字化手段来创新营销服务模式,以提升自身的服务水平和市场竞争力。

在此背景下,深入地研究数字化转型背景下电力营销精准服务模式创新具有重要的现实意义。本文就将从数字化转型对电力营销的影响出发,分析当前电力营销服务存在的问题,进而提出了具体的精准服务模式创新建议,最终可为电力企业的数字化转型和营销服务升级提供参考。

### 一、数字化转型对电力营销的影响

#### (一) 数据驱动决策成为可能

数字化技术的应用使电力企业能够收集和整合多维度的数据,其中包括了客户的基本信息、用电历史数据、设备运行数据、气象

数据等<sup>[1]</sup>。只有通过大数据分析技术,对这些数据进行深度地挖掘和分析,才能够揭示客户用电行为的规律和趋势,并且发现潜在的市场需求和问题。例如通过分析客户的用电时段分布、用电量变化等数据,电力企业就可以预测客户的用电需求,以此为基础优化电力资源配置,进而实现更加精准的电力供应和营销决策。

作者简介: 李欣(1978-),女,汉族,湖北武汉人,学历:本科,职称:副高,研究方向 营销管理。

## （二）客户需求更加多样化和个性化

在数字化时代当中，客户获取信息的渠道更加广泛，自身对于电力服务的认知和期望也发生了显著地变化。现阶段客户不已再满足于标准化的电力服务，而是希望获得更加个性化、定制化的服务体验<sup>[2]</sup>。如部分高耗能企业希望电力企业能够提供节能优化方案，帮助其降低用电的成本；家庭用户则更加关注用电的便捷性和智能化，期望通过智能家居设备实现对于用电的实时监控和控制。正是这种多样化和个性化的需求，才促使电力企业必须创新营销服务模式，以更好地满足客户需求。

## （三）服务渠道向线上线下融合转变

数字化技术的发展催生了众多新型的服务渠道，如手机 APP、微信公众号、网上营业厅等等。因为这些线上服务渠道具有便捷、高效、24 小时不间断地服务等优势，就能够满足客户随时随地地办理业务的需求<sup>[3]</sup>。但线下服务渠道如营业厅、服务网点等依然具有不可替代的作用，尤其是对于一些复杂业务的办理和客户面对面的沟通交流。因此电力营销服务渠道才逐渐地向线上线下融合的方向发展，借助线上和线下的资源，为客户提供无缝衔接的服务体验。

## （四）市场竞争格局发生变化

数字化转型直接降低了行业的准入门槛，此时一些新兴的能源服务企业借助数字化技术进入了电力市场，与传统的电力企业展开了竞争。由于这些企业通过提供差异化的服务和产品，吸引了部分客户，因而对传统电力企业的市场份额构成了威胁<sup>[4]</sup>。此外客户在数字化环境下，更加容易获取不同企业的服务信息和评价，他们能够更加便捷地进行服务选择和比较，这也在一定程度上加剧了电力市场的竞争程度。在此情况下，传统电力企业必须通过创新营销服务模式，来提升自身的竞争力，以应对日益激烈的市场竞争。

# 二、当前电力营销服务存在的问题

## （一）客户需求分析不够精准

目前许多电力企业对于客户需求的了解仍停留在表面层次，其缺乏深入的分析和研究。虽然企业积累了大量的客户用电数据，但由于数据整合和分析能力不足，无法充分地挖掘数据背后的客户需求和行为特征<sup>[5]</sup>。比如，在制定电力套餐和服务方案时，他们往往采用了“一刀切”的方式，而这缺乏了针对不同客户群体的个性化设计，导致服务与客户需求处于不匹配的状态，此时客户的满意度不高。

## （二）服务流程繁琐，效率低下

传统的电力营销服务流程涉及到了多个环节和部门，其业务办理的手续繁琐，客户通常需要耗费大量的时间和精力。如办理新装电表、用电变更等业务时，客户需要提交多项资料，然后往返多个部门进行审批，因而整个过程的耗时较长。此外不同业务系统之间的数据共享和协同不足，导致信息的重复录入和传递，进一步降低了服务的效率。

## （三）服务渠道协同性差

尽管电力企业已经建立了多种服务渠道，但各个渠道之间缺乏有效的协同和整合。原因是线上渠道和线下渠道在服务内容、服务流程和服务标准上存在着差异，致使客户在不同的渠道之间

切换时，往往需要重复地提供信息，导致客户的体验不佳。同时各个渠道之间的数据未能实现实时地共享和交互，无法为客户提供统一、连贯的服务体验。

## （四）服务产品创新不足

现如今电力企业提供的服务产品相对单一，主要集中在基本的供电服务和电费缴纳等方面，其中缺乏了具有创新性和差异化的服务产品。跟随着客户需求的多样化和个性化，传统的服务产品已难以满足市场的需求。像节能服务、电力金融服务、综合能源服务等领域，电力企业的服务产品均供给不足，进而无法充分地挖掘客户的潜在价值。

## （五）数据安全与隐私保护存在隐患

在数字化转型的过程中，电力企业收集和存储了大量的客户敏感信息和用电数据，一旦这些数据出现泄露或被篡改，将会给客户和企业带来严重的损失。然而，部分电力企业在数据安全和隐私保护方面的意识淡薄，且技术防护措施不足，其中存在着数据泄露、被攻击等安全隐患<sup>[6]</sup>。另外，相关的法律法规和标准规范的不完善，该问题也增加了数据安全管理的难度。

# 三、数字化转型背景下电力营销精准服务模式创新建议

## （一）构建精准的客户画像

### 1. 整合多维度数据

电力企业应整合客户的基本信息、用电数据、缴费记录、设备运行数据、市场调研数据等多个维度的信息。除了企业内部数据之外，还可以与外部数据供应商进行合作，以此获取客户的消费行为数据、社会属性数据等等，再丰富客户数据维度。

### 2. 运用大数据分析技术

基于大数据分析技术，电力企业能够对整合后的客户数据进行深度地挖掘和分析。即通过聚类分析、关联分析、预测分析等算法，来识别客户的用电行为模式、需求偏好和潜在需求。例如通过聚类分析将客户划分为不同的群体，像高耗能企业客户、普通居民客户、商业客户等等，并针对对于不同群体的特点，制定出个性化的服务策略和产品方案。

### 3. 动态更新客户画像

客户的需求和行为是不断变化的，因而客户画像需要进行动态地更新。为此电力企业应建立客户数据的实时监测和更新机制，及时地捕捉客户用电行为和需求的变化，再以此调整客户画像<sup>[7]</sup>。

## （二）优化服务流程

### 1. 简化业务办理流程

对电力营销业务流程一定要进行全面梳理和优化，去除其中冗余的环节，再简化业务的办理手续。即利用数字化技术实现业务流程的自动化和线上化，进而减少人工干预，提高业务办理的效率。举个例子，推行“一站式”服务，使得客户在一个平台或渠道上即可完成所有业务的办理，或者是采用电子签名、电子合同等技术，以此替代传统的纸质文件，达到缩短业务办理时间的目的。

### 2. 加强部门间协同

当电力企业建立了跨部门的协同工作机制，便能打破部门之间



的信息壁垒。即通过整合业务系统，来实现数据的共享和交互，从而确保各个部门之间信息的一致性和及时性。例如建立营销、计量、客服等部门的协同工作平台，进而实现客户信息、用电数据、服务工单等信息的实时共享，如此可提高问题处理的效率和准确性。

3. 引入智能客服系统

智能客服系统可以通过自然语言处理技术，来理解客户的问题和需求，并自动地提供准确的解答和解决方案<sup>[8]</sup>。对于一些常见问题和简单业务，智能客服系统还可以实现自助服务，这样能够减轻人工客服的工作压力。同时智能客服系统还可以对客户的问题进行分析和归类，为企业的改进服务流程和产品提供参考。

（三）创新服务渠道

1. 深化线上服务渠道建设

对于电力企业而言，需要不断地优化手机 APP、微信公众号、网上营业厅等线上服务渠道的功能和用户体验。即增加线上服务的种类和范围，进而实现更多业务的线上办理，如用电申请、电费查询、故障报修、节能咨询等等。再结合人工智能、大数据等技术，即可为客户提供个性化的服务推荐和智能引导，从而提高客户使用线上服务渠道的便捷性和满意度。

2. 提升线下服务渠道品质

一方面在线上，要加强线下营业厅、服务网点的建设和管理，以此提升服务人员的专业素质和服务水平。对于可以引入智能设备，如自助缴费终端、智能引导机器人等，来提高线下服务的效率和智能化程度。另外一方面，线下服务渠道还应注重与客户的面对面沟通和交流，为客户提供更加贴心、个性化的服务，弥补线上服务的不足。

3. 推进线上线下服务融合

一旦实现线上线下服务渠道的深度融合，即可构建无缝衔接的服务体系。如此一来，客户就可以在不同渠道之间自由地进行切换，此时无需重复地提交信息，便能享受一致的服务体验<sup>[9]</sup>。

（四）创新服务产品

1. 拓展节能服务产品

针对不同客户群体的节能需求，理应开发多样化的节能服务产品。一方面要为高耗能企业提供能源审计、节能改造方案设计、节能设备推广等服务；另一方面为家庭用户提供智能家居节能控制设备、节能用电咨询等服务。总而言之，要通过开展节能服务，来帮助客户降低用电的成本，同时也为电力企业开辟新的业务增长点。

2. 发展电力金融服务产品

结合电力行业的特点和客户需求，各企业都应创新电力金融服务产品。即推出电费分期支付、电力消费信贷、电力保险等金融产品，以满足客户的资金需求和风险管理需求。如为用电量大的企业提供电费融资服务，缓解企业的资金压力；又比如为家庭用户提供电力设备保险，旨在保障客户的用电安全。

3. 提供综合能源服务产品

顺应能源发展趋势，电力企业需要开展综合能源服务业务，进而为客户提供一站式的能源解决方案。此举核心在于整合电力、天然气、太阳能、风能等多种能源资源，进而为客户提供能源规划、能源供应、能源管理等服务。

（五）加强数据安全与隐私保护

1. 完善数据安全管理制度

建立健全的数据安全管理制度，在其中明确数据采集、存储、传输、使用、销毁等各个环节的安全管理要求和责任。同步制定数据访问权限管理规定，对于不同岗位的人员设置不同的数据访问权限，旨在防止数据泄露和滥用的情况出现。

2. 强化技术防护措施

借助先进的数据加密、访问控制、入侵检测、数据备份等技术，来加强对数据的安全防护。首先要对客户敏感信息和重要数据进行加密存储和传输，进而防止数据被窃取和篡改；其次要建立网络安全监测和预警系统，确保能够及时地发现和网络安全威胁；此外也许定期地对数据进行备份，保障数据的完整性和可用性<sup>[10]</sup>。

四、结束语

在数字化转型背景之下，创新电力营销精准服务模式是电力企业提升自身竞争力、满足客户需求的必然选择。为此需要通过构建精准的客户画像、优化服务流程、创新服务渠道与产品、加强数据安全与隐私保护等创新建议的实施，就能够有效地提升电力营销服务的精准性、高效性和智能化水平，进而增强客户满意度和企业市场竞争力。然而电力营销精准服务模式创新是一个长期的、持续的过程，还需要电力企业不断地探索和实践。因此在未来的发展中，随着数字化技术的不断进步和客户需求的不断变化，电力企业应持续地关注行业发展动态，并积极地引入新技术、新理念，在实践中不断地完善和优化精准服务模式，进而推动电力行业在数字化时代的高质量发展。

参考文献

[1] 王茜. 互联网+电力营销服务渠道数字化精准运营的探析[J]. 大众科学, 2024, 45(16): 117-119.  
[2] 谢樱. 新时代背景下基层治理模式的创新与发展研究[J]. 文教资料, 2024, (20): 110-113.  
[3] 赵清. 数字化转型背景下企业财务管理模式创新研究[J]. 知识经济, 2024, (34): 124-126.  
[4] 程超, 公维帅, 崔希伟, 等. 数智化驱动全链条合规管理的电力营销体系构建[J]. 企业界, 2024, (20): 76-80.  
[5] 陈广仁, 马楷鑫, 蔡志福. 制造型企业服务转型背景下全城数字化服务场景创新研究——以格力电器为案例[J]. 中国商论, 2024, 33(13): 138-142.DOI: 10.19699/j.cnki.issn2096-0298.2024.13.138.  
[6] 俞梁. 数字化转型背景下企业员工激励模式创新研究[J]. 中国会展, 2024, (24): 136-138.  
[7] 李佳宜. 数字化转型背景下厦门象屿商业模式创新及绩效研究[D]. 内蒙古自治区: 内蒙古财经大学, 2024.DOI: 10.27797/d.cnki.gnmgc.2024.000444.  
[8] 赵一帆. 数字化转型背景下商业银行对工商企业 服务模式的创新研究[J]. 大众文摘, 2024, (34): 0015-0017.  
[9] 许岳川. 数字化转型背景下企业管理模式的创新与实践研究[J]. 前卫, 2024, (1): 0201-0203.  
[10] 滕洁, 邵向前, 张晓琳. 基于数字化转型背景下客户分层分类营销服务模式研究与应用[J]. 葡萄酒, 2024, (20): 0193-0195.



# 多传感器融合的智能仓储 AGV 导航控制与路径优化研究

孙健鹏

天津渤海职业技术学院, 天津 300000

DOI:10.61369/EPTSM.2025040009

**摘要：** 本文研究智能仓储 AGV 系统关键技术, 探讨多传感器融合、导航控制及路径优化, 并分析实际难题与解决办法。多传感器融合通过整合激光雷达、摄像头等数据, 结合卡尔曼滤波等算法, 提升 AGV 环境感知、定位精度与稳定性。基于该技术的导航控制借助 SLAM 算法实现定位与地图构建, 结合分层架构调整策略; 路径优化分析了算法适用性及改进方向。针对数据同步、实时性和稳定性问题, 提出了相应解决方案。研究表明, 多传感器融合与路径优化结合可显著提升 AGV 性能。

**关键词：** 智能仓储; AGV; 多传感器融合; 导航控制; 路径优化

## Research on Sensor Fusion-Based Navigation Control and Path Optimization for Intelligent Warehouse AGVs

Sun Jianpeng

Tianjin Bohai Vocational and Technical College, Tianjin 300000

**Abstract :** This paper investigates the key technologies of intelligent warehouse AGV systems, exploring multi-sensor fusion, navigation control, and path optimization, and analyzing practical challenges and solutions. Multi-sensor fusion enhances AGV environmental perception, positioning accuracy, and stability by integrating data from LiDAR, cameras, and other sensors, combined with algorithms such as Kalman filtering. Navigation control based on this technology utilizes SLAM algorithms for positioning and map building, incorporating a hierarchical architecture adjustment strategy. Path optimization analyzes algorithm applicability and directions for improvement. Solutions are proposed for data synchronization, real-time performance, and stability issues. The research demonstrates that the combination of multi-sensor fusion and path optimization can significantly enhance AGV performance.

**Keywords :** intelligent warehouse; AGV; multi-sensor fusion; navigation control; path optimization

## 引言

随着智能制造与物流发展, 智能仓储对 AGV 需求迫切, 其导航精度、环境适应力和效率影响仓储系统性能。但单一传感器有局限, 如激光雷达难测透明物体、摄像头受光照影响, 导致感知与定位不足; 动态仓储布局和多 AGV 协同也对路径规划的实时性与最优性要求更高。为此, 多传感器融合技术因数据互补性提升 AGV 感知与定位能力, 高效导航控制和路径优化算法是其高效作业核心。本文聚焦智能仓储 AGV, 分析多传感器融合原理与优势, 探讨相关导航控制和路径优化策略, 解决实际难题, 为提升 AGV 性能提供参考。

## 一、多传感器融合技术

### (一) 常见传感器原理与特点

AGV 系统中, 激光雷达、摄像头和红外传感器各有优势与局限。激光在探测方面具有直线传播特性以及优先的抗干扰能力, 且具有较高的精度。所以在探测传感器方面, 激光雷达是很好的选择。激光雷达的距离测量原理主要可以分为两种类型: 三角测距法 (如图1所示) 与飞行时间法 (如图2所示)。通常来说, 使用飞行时间法的激光雷达测量精度较高, 而使用三角测距法的激光雷达实现较为简便<sup>[1]</sup>。

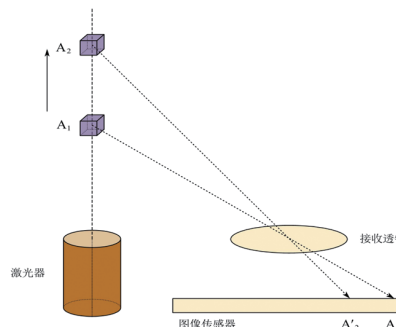


图1 激光雷达三角测距法

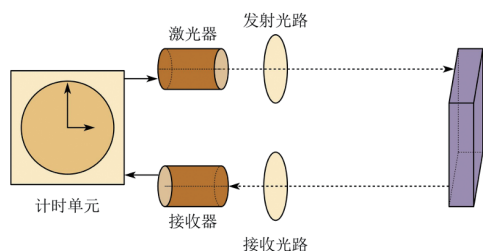


图2 激光雷达飞行时间测距法

摄像头依靠光学成像捕捉视觉信息转化为数字图像，在图像识别和环境感知上，能提取纹理、颜色等丰富信息，实现标志物识别与动态障碍物检测。但低光照下性能不佳，图像处理计算需求高，实时性受限。在 AGV 中，常与其他传感器结合，RGB-D 摄像头兼具二维图像与三维空间数据获取能力，增强环境认知。红外传感器基于红外线物理特性，通过检测目标红外辐射探测障碍物、测量距离，非接触式测量使其在近距离避障表现突出，对环境光敏感度低，可在黑暗中工作。不过，测量范围和精度受物体表面温度、发射率影响。在 AGV 系统中，主要用于近距离防碰撞检测，也可与其他传感器协同，提升系统可靠性。

### （二）多传感器融合优势分析

多传感器融合技术整合激光雷达、摄像头等不同类型传感器数据，从环境感知、定位精度、系统稳定性等多维度提升 AGV 系统性能。各类传感器存在天然局限，如激光雷达虽测距精准却难以检测透明物体，摄像头图像识别能力强却易受光照干扰，而多传感器融合将它们的数据互补整合，可实现复杂环境下的全面感知。在定位精度方面，多源数据融合的 SLAM 算法优势显著。研究显示，相较于单一传感器定位，该算法能将定位误差控制在毫米级，满足智能仓储等场景对高精度定位的严苛要求<sup>[2]</sup>。此外，多传感器融合赋予系统更强的鲁棒性，当某一传感器因故障或环境干扰失效时，其余传感器仍能持续提供有效信息，确保 AGV 系统稳定运行，避免因单点故障导致整体瘫痪。

### （三）多传感器融合算法

多传感器融合算法是实现高效数据融合的关键，卡尔曼滤波和粒子滤波是其中常用方法。卡尔曼滤波基于线性系统模型，经预测和更新优化传感器数据融合，适用于动态环境下的实时定位与跟踪，但处理非线性系统能力不足，需结合扩展卡尔曼滤波或无味卡尔曼滤波改进。粒子滤波基于蒙特卡洛方法，通过随机采样粒子逼近系统状态后验概率分布，在非线性、非高斯噪声环境下的数据融合表现出色。在 AGV 导航系统中，卡尔曼滤波和粒子滤波常被用于融合激光雷达、摄像头等多源数据，实现高精度位姿估计与环境建模<sup>[3]</sup>。此外，基于深度学习的融合方法正逐渐兴起，通过神经网络进行特征提取与联合优化，进一步提升融合效果。

## 二、基于多传感器融合的 AGV 导航控制

### （一）SLAM 算法实现精准定位与地图构建

同时定位与地图构建（SLAM）算法是 AGV 导航技术核心，致力于解决机器人在未知环境中的定位与地图构建难题。其基于

传感器获取环境信息，结合机器人运动模型实现实时状态估计和环境建模<sup>[4]</sup>。在多传感器融合框架下，SLAM 算法能有效利用激光雷达、摄像头和惯性测量单元等数据，提升定位精度与地图构建准确性。激光雷达凭借高精度距离测量构建环境几何结构，摄像头则通过图像识别补充语义信息，增强地图实用性。基于扩展卡尔曼滤波或粒子滤波的融合方法，可处理数据噪声与不确定性，提高定位和建图的鲁棒性。

在实际应用中，多传感器融合的 SLAM 算法面临诸多挑战。不同传感器数据需进行精确时间同步和空间配准，保证数据一致性与可用性；针对数据中的噪声干扰，动态加权、自适应滤波等方法可增强数据融合可靠性；引入闭环检测机制后，机器人重访已探索区域时能优化地图构建结果，进一步提升定位精度。这些关键技术相互配合，助力 AGV 在复杂仓储环境中实现高精度定位与地图构建，为后续导航任务筑牢根基。

### （二）实时环境信息下的导航策略调整

在智能仓储环境中，AGV 需要根据实时获取的环境信息动态调整导航策略，以应对障碍物位置变化、货物存放情况更新等复杂场景。这一过程依赖于多传感器融合技术对环境信息的全面感知和精确处理。例如，通过激光雷达和深度相机的协同工作，AGV 能够实时检测前方障碍物的位置和形状，并基于此规划避障路径<sup>[5]</sup>。此外，结合 RGB-D 摄像头和 AR 视觉标签的定位技术，可以进一步提高对环境变化的感知能力，确保 AGV 在动态环境中安全行驶。

为了实现高效的导航策略调整，AGV 通常采用分层控制架构，将全局路径规划与局部避障相结合。在全局层面，改进的萤火虫算法或其他启发式算法可用于生成从起点到终点的最优路径；而在局部层面，动态窗口法等反应式算法则负责根据实时环境信息调整机器人的运动轨迹。这种分层控制架构不仅提高了导航系统的灵活性，还显著增强了 AGV 对复杂环境的适应能力。实验结果表明，基于多传感器融合的导航策略调整方法能够在保证安全性的同时，有效缩短路径长度并减少规划时间，从而提升整体运行效率<sup>[6]</sup>。

### （三）导航控制系统设计与实现

基于多传感器融合的 AGV 导航控制系统由硬件和软件协同构成，实现高效稳定的导航功能。硬件层面，系统涵盖传感器模块、主控板与执行机构。传感器模块负责采集环境信息，激光雷达用于测距，深度相机进行三维重建，惯性测量单元完成姿态估计；主控板采用 Jeston Nano、STM32F4 等处理器，承担数据处理和决策；执行机构则根据主控板指令，驱动麦克纳姆轮等实现 AGV 多方向移动<sup>[7]</sup>。此外，硬件设计需合理规划传感器布局，保障数据传输可靠性，充分发挥多传感器融合效能。

软件层面，导航控制系统基于机器人操作系统（ROS）开发，借助其模块化架构集成功能组件。系统分为感知、决策、执行三层：感知层采集并预处理传感器数据，决策层依据感知结果规划路径、调整导航策略，执行层将决策转化为控制指令。为提升实时性与稳定性，软件设计优化算法复杂度，并运用多线程处理机制。经实验验证，这种软硬件协同设计的导航控制系统，可在复杂仓储环境中实现高精度定位与高效路径跟踪，满足智能仓储对 AGV 导航性能的需求。

### 三、智能仓储 AGV 路径优化

#### （一）常见路径规划算法分析

在智能仓储中，路径规划算法直接影响 AGV 运行效率与任务质量。A\* 算法作为经典启发式搜索算法，结合起点到当前节点实际代价与当前节点到目标节点估计代价，能快速找到较优路径。但在复杂仓储环境下，若启发函数设计不当，易偏离全局最优，且计算量会随环境复杂度大幅增加。Dijkstra 算法通过扩展最短路径树，虽能确保找到起点到各节点最短路径，却因计算复杂度高，在动态环境中实时性差，难以满足多 AGV 协同作业需求。遗传算法通过模拟生物进化实现全局优化，可在复杂环境中逼近全局最优解，但存在收敛慢、依赖初始种群，易出现求解耗时或陷入局部最优的问题<sup>[8]</sup>。因此，在智能仓储中选择路径规划算法，需结合具体任务与仓储布局，综合考量路径优化效果、计算效率和环境适应性，以实现三者平衡。

#### （二）考虑仓储因素的路径优化影响

仓储布局、货物存放情况与 AGV 自身性能显著影响路径优化效果。仓储布局的复杂程度直接决定路径规划算法的搜索空间，在密集存储区域，AGV 避障频繁，这就要求路径规划算法具备强大的局部搜索能力，防止出现死锁或冲突<sup>[9]</sup>。货物存放位置并非固定不变，其动态变化会改变仓储环境的可行路径，因此路径规划算法需要具备实时更新环境信息、重新计算最优路径的能力。AGV 自身的最大速度、转弯半径、负载能力等性能参数，也是路径优化模型必须考虑的约束条件，只有将这些参数纳入考量，才能保障规划出的路径既可行又高效。将仓储相关因素融入路径规划算法，有助于提升 AGV 在复杂环境下的适应能力，同时减少任务完成时间，降低能耗。

#### （三）算法改进与融合实现高效路径规划

为解决智能仓储复杂路径规划问题，研究者提出多种算法改进与融合策略。将传统与智能优化算法结合是常用方法，如 A 算法与人工势场法融合，以人工势场法快速收敛特性生成初始路径，再经 A 算法全局优化，兼顾路径光滑度与计算效率。也有策略将多种算法优势互补，像遗传算法与蚁群算法结合，凭借遗传算法全局搜索、蚁群算法正反馈机制，优化路径长度与安全性。此外，基于深度学习的路径规划方法备受关注，改进的 DQN 算法引入经验知识模型，助力 AGV 提前规避冲突与障碍物，加速算法收敛、缩短行程时间<sup>[10]</sup>。这些策略有效提升路径规划效率，为智能仓储 AGV 实际应用提供灵活可靠方案。

#### 参考文献

- [1] 陈浩泽. 多传感器融合 AGV 在仓储环境导航的应用研究 [D]. 北部湾大学, 2024.
- [2] 徐欣川, 陈琦璋, 余峰, 肖吴远, 柯英, 程健, 吴建军. 基于多传感器信息融合的 AGV 自主无轨导航技术 [J]. 湖北理工学院学报, 2024, 40(3): 13-17.
- [3] 李浩, 杜开成, 邢志远, 王广伟, 张皓博, 刘根. 基于多传感器融合的物流 AGV 精准定位及在人机安全中的应用 [J]. 制造技术与机床, 2024, (5): 63-69.
- [4] 王云峰, 曹小华, 郭兴. 基于改进 A\*(\*) 算法和系统短期状态预测的仓储 AGV 路径规划方法 [J]. 计算机集成制造系统, 2023, 29(11): 3897-3908.
- [5] 杨惠, 周小燕. 基于多传感器数据融合的 AGV 定位方法研究 [J]. 电子测试, 2021, 32(10): 42-43.
- [6] 司明, 郭伯藩, 胡灿, 邢伟强. 智能仓储交通信号与多 AGV 路径规划协同控制方法 [J]. 计算机工程与应用, 2024, 60(11): 290-297.
- [7] 钱晓明, 黄宇轩, 楼佩煌, 孙天. 基于多传感器融合的跟随 AGV 复合导引技术 [J]. 农业机械学报, 2022, 53(1): 14-22.
- [8] 张艳菊, 吴俊, 程锦倩, 陈泽荣. 多搬运任务下考虑碰撞避免的 AGV 路径规划 [J]. 计算机应用研究, 2024, 41(5): 1462-1469.
- [9] 朱明明, 伍玉霞. 基于多传感器融合的 AGV 导航技术 [J]. 机械设计与制造工程, 2024, 53(5): 61-66.
- [10] 谢勇, 郑绥君, 程念胜, 朱洪君. 基于改进 DQN 算法的无人仓多 AGV 路径规划 [J]. 工业工程, 2024, 27(1): 36-44.

### 四、实际应用中的技术难题与解决办法

#### （一）传感器数据同步问题

在多传感器融合的 AGV 导航控制系统中，传感器数据同步是确保系统定位精度和环境感知可靠性的核心技术。实际工程应用中，由于不同传感器（如激光雷达与摄像头）的采集频率存在显著差异，加之网络带宽限制和硬件接口性能等因素导致的数据传输延迟，往往会造成多源数据的时间戳不一致问题，从而严重影响后续融合算法的性能表现。针对这一技术难题，在硬件层面，可以采用基于外部时钟信号的同步触发机制，实现对多传感器采集时刻的统一控制；在软件层面，设计高精度的时间戳插值补偿算法，有效解决异步数据的时序对齐问题。

#### （二）算法实时性问题

动态仓储中 AGV 路径优化与导航控制对实时性要求高，需快速响应环境变化。但计算复杂度与传感器数据量制约算法实时性，如深度学习目标识别因计算密集耗时，数据处理融合也加剧挑战。可从三方面解决：优化算法效率，简化模型或用轻量化算法降计算负担；借助 GPU 等硬件加速技术提升数据处理速度；设计分层架构，分离高实时性关键任务与低优先级任务，保障关键任务及时执行，兼顾算法性能与实时性需求。

#### （三）系统稳定性问题

在实际仓储中，AGV 导航控制系统常面临稳定性挑战，影响作业安全与效率。电磁干扰会致传感器信号失真、数据传输错误，干扰导航精度；地面不平与振动会干扰运动控制，引发定位偏差。为保障系统稳定，硬件上可采用电磁屏蔽，使用屏蔽电缆、滤波电路，优化传感器安装与固定；软件层面引入容错机制，通过冗余设计和异常检测算法处理故障。通过软硬件协同，能提升 AGV 导航控制系统的鲁棒性与可靠性，为智能仓储高效运作提供支撑。

### 五、结束语

多传感器融合技术整合激光雷达等数据，弥补单一传感器局限，结合相关算法从多维度提升 AGV 性能，实现复杂环境感知与高精度定位。基于该技术的导航控制系统借 SLAM 算法实现精准定位与地图构建，结合分层架构和软硬件协同保障实时性与可靠性。路径优化上，单一算法有局限，算法改进与融合可提升效率与最优性，需考虑仓储相关因素。针对实际问题，相应解决方案能提升系统鲁棒性。综上，多传感器融合与路径优化结合是未来发展关键，为智能仓储升级提供支撑。



# 基于人工智能的火电机组热控系统优化与故障诊断研究

冯栋, 张向伟, 何龙, 巩家庆, 姬广丰  
华能兰州热电有限责任公司, 甘肃 兰州 730104  
DOI:10.61369/EPTSM.2025040010

**摘要 :** 本文针对火电机组热控系统运行复杂和易受干扰及故障频发等问题, 研究人工智能技术在此领域的应用。介绍热控系统组成、功能及运行挑战并阐述神经网络、机器学习等人工智能算法, 通过数据处理来实现热控系统参数与控制策略优化, 进而为火电机组智能化运行提供支撑。

**关键词 :** 人工智能; 火电机组; 热控系统; 系统优化; 故障诊断

## Research on Optimization and Fault Diagnosis of Thermal Control System for Thermal Power Units Based on Artificial Intelligence

Feng Dong, Zhang Xiangwei, He Long, Gong Jiaqing, Ji Gangfeng  
Huaneng Lanzhou Thermal power Co., LTD., Lanzhou, Gansu 730104

**Abstract :** This paper addresses the complex operation, susceptibility to interference, and frequent failures of thermal control systems in thermal power units, exploring the application of artificial intelligence (AI) technology in this field. It introduces the components, functions, and operational challenges of thermal control systems, and explains AI algorithms such as neural networks and machine learning. By processing data, these algorithms optimize the parameters and control strategies of thermal control systems, thereby supporting the intelligent operation of thermal power units.

**Keywords :** artificial intelligence; thermal power unit; thermal control system; system optimization; fault diagnosis

## 引言

随着能源需求增长与环保要求提升, 火电机组需更高效和稳定运行。然而其热控系统结构复杂且运行干扰因素多, 设备老化易引发故障, 传统控制与诊断方法难以满足需求。人工智能技术凭借强大的数据处理与学习能力为热控系统优化与故障诊断带来新契机, 成为当前火电机组研究的关键方向。

## 一、火电机组热控系统概述

### (一) 热控系统的组成与功能

火电机组热控系统是一个高度集成且复杂的自动化体系, 其核心目标是实现对机组运行过程中各类热工参数的精准监测与有效控制, 保障机组安全稳定又高效运行。从系统架构来看主要由硬件设备与软件控制系统两大部分组成。

硬件设备层面, 热控系统包含众多关键组件, 传感器作为系统的“感知器官”, 承担着采集温度、压力以及流量和液位等各类热工参数的重要任务。例如在锅炉系统中温度传感器实时监测

炉膛温度, 为燃烧控制提供关键数据; 压力传感器则时刻检测蒸汽压力来保障系统运行安全。执行器是热控系统的“手脚”, 依据控制指令对设备进行操作, 如电动调节阀通过改变开度调节介质流量, 气动执行机构控制风门挡板, 调整风量以优化燃烧过程。而控制器则是系统的“大脑”, 接收传感器采集的数据并经过运算处理后向执行器发出控制指令, 常见的控制器有可编程逻辑控制器 (PLC) 和分布式控制系统 (DCS) 的控制器模块<sup>[1]</sup>。

软件控制系统方面, 分布式控制系统 (DCS) 是火电机组热控系统的核心软件架构。它采用分散控制和集中管理的模式, 将整个系统划分为多个现场控制单元 (FCU) 和操作站单元。现场控制单元



部署在设备现场，负责对本地设备进行实时监测与控制，实现数据采集、信号处理和控制算法的执行。例如在汽轮机的现场控制单元中会对汽轮机的转速、振动等参数进行实时采集和分析，并根据预设控制策略调节进汽阀门以确保汽轮机稳定运行。操作站单元通常设置在电厂的主控制室，为操作人员提供人机交互界面，操作人员可通过操作站实时监控机组运行状态来进行参数调整和设备启停等操作，同时操作站还能对各现场控制单元上传的数据进行集中处理和存储，生成运行报表和趋势曲线从而便于运行人员分析机组运行状况<sup>[9]</sup>。

从功能角度分析，热控系统具备多种关键功能，自动检测功能能够持续采集和分析机组运行的各类参数并通过模拟量测仪表、巡回检测数字式显示仪表等设备来实现对温度、压力、流量等参数的精确测量和实时显示，一旦参数超出正常范围，系统立即发出报警信号，提醒操作人员采取措施。自动调节功能是热控系统的核心功能之一，它基于反馈控制原理，根据设定值与实际测量值的偏差来自动调整控制量，使系统参数稳定在目标范围内。以锅炉汽温调节为例，当检测到蒸汽温度偏离设定值时自动调节系统会迅速调整减温水流量或燃烧工况，使汽温恢复到正常水平。自动保护功能在机组出现异常工况或故障时发挥关键作用，通过实时监测机组状态和参数，一旦检测到危及设备安全的情况，如汽轮机超速、锅炉超压等，系统立即触发保护动作，自动停机或采取相应的保护措施来防止事故扩大，进而保障设备和人员安全<sup>[9]</sup>。此外热控系统还具备远方控制和程序控制功能，远方控制允许操作人员在控制室远程操作现场设备，提高操作的便捷性和安全性；程序控制则按照预先设定的程序和逻辑，自动完成设备的启动和停止以及一系列复杂的操作流程，减少人工干预以提高生产效率和操作准确性（如下表）。

表1 火电机组热控系统组成及功能

组成部分	细分内容	主要功能
硬件设备	传感器	采集温度、压力、流量、液位等热工参数（如锅炉炉膛温度、蒸汽压力）
	执行器	依据控制指令操作设备（如电动调节阀调节介质流量、气动执行机构调整风量）
	控制器	接收传感器数据，运算后向执行器发指令（如PLC、DCS 控制器模块）
软件控制系统	分布式控制系统（DCS）	分散控制与集中管理，含现场控制单元（实时监测本地设备）和操作站单元（人机交互、集中管理）

（二）热控系统运行特点与挑战

火电机组热控系统运行有复杂性和强耦合性的特点，其系统里有很多设备和控制回路，各部分之间相互关联且相互影响。一个参数变化可能会引起其他多个参数波动，牵一发而动全身，比如锅炉燃烧时燃料量变化不仅会影响炉膛温度，还会影响蒸汽流量、压力和汽包水位等参数。同时热控系统运行容易受到多种因素干扰，外部环境的温度和湿度变化，内部设备的老化以及磨损等都可能让系统运行不稳定。而且火电机组在不同负荷下热控系统的动态特性会变，这对控制系统的适应能力要求很高<sup>[10]</sup>。

另外火电机组运行时间越长，热控系统的设备越容易老化，

故障发生的概率也会增加。常见故障有传感器故障、执行器故障、控制器故障等，而这些故障如果不能及时发现和处理就可能会导致机组运行异常，甚至引发安全事故。据统计，热工专业造成的机组非停占比很大，主要原因是设备问题和人为因素。设备原因包括设备本身有设计缺陷、老化、故障等，人为因素会引起设备误动或拒动。所以如何提高热控系统的可靠性并且能够及时准确地诊断和处理故障是当前火电机组运行面临的重要问题<sup>[5]</sup>。

二、人工智能技术在火电机组热控系统中的应用基础

（一）常用人工智能算法介绍

1. 神经网络算法

神经网络算法模拟人类大脑神经元的结构和功能，它由很多神经元节点相互连接而成，通过学习大量数据来建立输入和输出之间的复杂关系。在火电机组热控系统中神经网络可以用来建立热工过程模型、预测参数变化趋势和诊断故障等，比如训练神经网络模型后可以根据当前运行参数准确预测未来一段时间的蒸汽温度和压力等参数，为提前调整控制策略提供依据。常见的神经网络模型有多层感知器（MLP）、径向基函数神经网络（RBF）、递归神经网络（RNN）和它的变体长短期记忆网络（LSTM）等。其中 MLP 适合处理简单的非线性映射问题；RBF 有局部逼近能力且学习速度快；RNN 和 LSTM 更擅长处理时间序列数据，能捕捉热工过程中的动态变化信息<sup>[6]</sup>。

2. 机器学习算法

机器学习算法能让计算机通过数据学习模式并进行预测，包括监督学习、无监督学习和半监督学习等类型。在火电机组热控系统中监督学习算法可以用于故障分类和诊断，通过收集大量已知故障类型的样本数据来训练分类模型，如支持向量机（SVM）、决策树、随机森林等，让它们能根据新的故障特征准确判断故障类型。无监督学习算法可以发现数据中的潜在模式和异常点，比如用聚类算法对热控系统的运行数据进行分析并区分正常和异常数据，有助于及时发现潜在故障。半监督学习算法结合少量标注数据和大量未标注数据进行学习，在标注数据难获取时很有用<sup>[7]</sup>。

（二）火电机组热控系统数据特征与处理

火电机组热控系统运行时会产生大量数据，这些数据有多维度、非线性、时变性等特征。其中多维度是指数据包括温度、压力、流量、液位等多种热工参数；非线性是因为热工过程复杂，参数之间不是简单的线性关系；时变性是因为机组运行工况会随时间变化，数据特征也会跟着变<sup>[8]</sup>。

为了有效利用这些数据，需要进行一系列处理。首先是数据采集，通过各种传感器和数据采集设备来实时获取热控系统的运行数据；然后进行数据清洗，去掉数据中的噪声、异常值和缺失值。对于噪声数据可以用滤波算法处理，对于异常值可以通过设阈值、用统计方法或机器学习算法识别并剔除，而对于缺失值可以用插值法、均值填充法、基于模型的预测填充法等填补<sup>[9]</sup>。

接着进行数据特征提取和选择，从原始数据中找出能反映系统运行状态的关键特征，减少数据维度并提高算法的运行效率和

准确性。特征提取方法有主成分分析（PCA）、线性判别分析（LDA）、小波变换等；特征选择方法有基于统计检验的方法、基于信息增益的方法、基于机器学习模型的方法等<sup>[10]</sup>。

最后还要对处理后的数据进行归一化或标准化处理，把数据映射到特定区间，如 [0, 1] 或 [-1, 1]，消除不同特征之间量纲和数量级的影响，让算法能更好地收敛和学习。

### 三、基于人工智能的火电机组热控系统优化

#### （一）热控系统参数优化

##### 1. 建立优化模型

以火电机组的运行效率、经济性和安全性等为优化目标，综合考虑热控系统中各个设备和参数之间的关系来建立数学优化模型。比如以机组发电效率最大为目标，把锅炉燃烧效率、汽轮机热效率、热控系统控制精度等作为约束条件。其中模型中的决策变量包括燃料量、风量、给水量、蒸汽压力等热控系统的关键参数，通过优化调整这些决策变量去让目标函数达到最优。

##### 2. 优化算法应用

把建立的优化模型和人工智能算法结合起来，求出最优的参数组合，可以用遗传算法、粒子群优化算法、模拟退火算法等智能优化算法。以遗传算法为例，先对决策变量进行编码并生成初始种群；然后通过选择、交叉和变异等操作来不断更新种群，让种群中的个体逐渐接近最优解。每一代迭代时根据优化模型计算每个个体的适应度值，判断其好坏，经过多代进化，最后得到满足优化目标的最优参数组合。粒子群优化算法模拟鸟群觅食，每个粒子代表一个可能的解，粒子根据自身历史最优位置和群体全局最优位置调整飞行速度和位置来找到最优解。模拟退火算法从一个初始解开始，通过随机扰动产生新解，按一定概率接受较差的解，避免陷入局部

最优解，随着温度降低，最终找到全局最优解。

#### （二）热控系统控制策略优化

##### 1. 基于强化学习的控制策略设计

针对火电机组热控系统在不同工况下的复杂动态特性，设计基于强化学习的控制策略。首先要确定强化学习中的智能体、环境、状态、动作和奖励，智能体是热控系统的控制器，而环境是整个火电机组热控系统；与此同时状态可以选热控系统的关键运行参数，如蒸汽温度、压力、流量、机组负荷等；动作是控制器对执行器发出的控制指令，如调节阀门开度、调整电机转速等。奖励函数的设计很重要，它要能反映系统的运行性能，比如机组发电效率提高、能耗降低以及参数更稳定等都可以作为奖励。系统运行状态好，接近或达到优化目标时给正奖励；运行出现偏差或故障时给负奖励。

##### 2. 仿真与实际应用验证

在仿真环境中验证基于强化学习的控制策略，用火电机组的详细仿真模型能够模拟各种工况下热控系统的运行情况，观察智能体在不同状态下的决策和系统的响应效果。和传统控制策略（如PID控制）对比，看基于强化学习的控制策略在控制精度、响应速度、抗干扰能力等方面的优势，仿真结果显示基于强化学习的控制策略能让热控系统更快响应工况变化，更准确地跟踪设定值，面对干扰时更稳定，也有效提高了系统的控制性能。

### 四、结束语

本文将人工智能应用于火电机组热控系统，在系统优化与故障诊断方面取得显著成果，有效提升了机组运行效率与稳定性。未来随着人工智能技术不断发展可进一步深化其在热控系统中的应用，探索多算法融合并加强与实际运行场景结合，为火电机组智能化升级提供更有有力保障。

### 参考文献

- [1] 贺兵. 基于人工智能的发电机组协调系统实时优化控制分析 [J]. 集成电路应用, 2024, 41(11): 226-227.
- [2] 杜文. 数据驱动下的智能发电系统应用架构及关键技术 [J]. 中国高科技, 2024, (16): 114-116.
- [3] 刘晓莎, 刘林林, 寿德武. 基于智能算法的火电机组变负荷控制策略优化 [J]. 湖南邮电职业技术学院学报, 2024, 23(01): 36-40.
- [4] 王宇鹏. 浅谈人工智能应用于火电厂的发展前景 [C]// 中国电力技术市场协会. 2023年电力行业技术监督工作交流会暨专业技术论坛论文集（上册）. 新疆华电高昌热电有限公司, 2023: 684-685.
- [5] 马颖骏. 火电机组热控现场故障自动检测系统设计 [J]. 自动化与仪器仪表, 2019, (10): 52-55.
- [6] 冯海波. 电厂单元机组热控系统的分散控制系统改造设计 [J]. 河南科技, 2021, 40(34): 37-39.
- [7] 姜晓强. 基于粗糙集-BP神经网络的火电机组热控电源自动配置模型 [J]. 自动化应用, 2022, (07): 35-37.
- [8] 王腾, 张丽, 迟青青. 基于模糊PID的火电厂热控系统优化控制方法 [J]. 电气技术与经济, 2024, (12): 253-255.
- [9] 李锐. 提高火电厂热控系统可靠性技术研究 [J]. 仪器仪表用户, 2023, 30(09): 99-101+40.
- [10] 徐伯梁. 火电厂热控系统的可靠性研究 [J]. 科学家, 2017, 5(11): 70-71.

# 光储充一体化电站的电气自动化控制策略研究

吴俊强

数源科技股份有限公司, 浙江 杭州 310000

DOI:10.61369/EPTSM.2025040013

**摘 要：** 光储充一体化电站结合了光伏发电、储能系统和充电桩，作为现代新能源系统的重要组成部分，对促进可再生能源的利用和电力系统的智能化具有重要意义。电气自动化控制在这一系统中发挥着至关重要的作用，主要通过实时监控、能源调度和安全保护等手段，优化电站的运行效率与稳定性。通过设计智能化控制策略，协调光伏发电、储能与充电桩之间的功率平衡，实现对电池的精细管理与能效提升，确保电网安全稳定运行。控制策略的优化可有效降低系统故障率，提升电池使用寿命，并降低运行成本，为未来的绿色能源系统提供技术支持和理论依据。

**关 键 词：** 光储充一体化电站；电气自动化控制；能源调度；储能管理；智能化系统

## Research on Electrical Automation Control Strategy for Integrated Photovoltaic-Storage-Charging Power Station

Wu Junqiang

Shuyuan Technology Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310000

**Abstract：** The integrated photovoltaic-storage-charging power station combines photovoltaic power generation, energy storage systems, and charging piles. As an important component of modern renewable energy systems, it is significant in promoting the utilization of renewable energy and the intelligence of power systems. Electrical automation control plays a crucial role in this system, mainly optimizing the operational efficiency and stability of the power station through real-time monitoring, energy scheduling, and safety protection. By designing intelligent control strategies, coordinating the power balance between photovoltaic power generation, energy storage, and charging piles, fine management of batteries and energy efficiency improvement are achieved, ensuring the safe and stable operation of the power grid. The optimization of control strategies can effectively reduce system failure rates, improve battery life, and lower operating costs, providing technical support and theoretical basis for future green energy systems.

**Keywords：** integrated photovoltaic-storage-charging power station; electrical automation control; energy scheduling; energy storage management; intelligent system

### 引言

光储充一体化电站作为能源革命的重要组成部分，已逐渐成为实现绿色低碳目标的关键技术。通过整合太阳能发电、储能和充电设施，不仅提高了能源利用效率，还促进了电力系统的智能化发展。电气自动化控制技术在其中发挥着核心作用，确保系统的高效、安全、稳定运行。随着智能化控制策略的不断优化，光储充一体化电站在节能减排、系统稳定性以及经济效益方面展现出巨大的潜力，对未来电力系统的构建具有重要意义。

### 一、光储充一体化电站的系统构成与工作原理

#### 1. 光储充一体化电站的系统构成

光储充一体化电站由太阳能光伏发电系统、储能系统和充电桩系统三部分组成。光伏发电系统是电站的核心，通过光伏面板将太阳能转化为电能，随后通过逆变器将直流电转换为交流电，供电网或储能系统使用。逆变器适配电网的需求，确保电能的稳

定输出。

储能系统主要由锂电池或其他先进电池设备构成，储存光伏发电中产生的多余电能。这些储能设备能够在电力需求高峰时释放电能，平衡电网负荷，提升电站的供电稳定性。在电网出现故障或波动时，储能系统还可提供应急电力支持，确保电网的持续运行。

充电桩系统连接电站与电动汽车，负责为电动汽车充电。该



系统与储能设备紧密协作，确保电动汽车充电过程中不会对电网造成过大压力，并最大限度地利用光伏发电提供的清洁能源，降低碳排放，推动可持续交通发展<sup>[1]</sup>。

## 2. 光储充一体化电站的工作原理

太阳能光伏发电系统通过光伏面板吸收太阳光，将光能转化为直流电。逆变器的作用是将直流电转换为交流电，输送至电网或电池储能系统。根据电站的需求，光伏发电的电能可以直接供给负载使用，也可以储存于电池中备用。光伏发电系统的输出功率受天气、光照强度和时间等因素影响，通常会随着日照变化而波动。因此，光伏系统需要与储能系统配合，以保证电站运行的稳定性。

储能系统的充放电原理决定了电池如何高效、安全地存储和释放电能。当光伏系统发电量大于实际需求时，多余的电能会通过充电管理系统进入储能设备。当电网负荷高峰或光照不足时，储能系统会将之前储存的电能释放出来，维持电网的平衡。为了确保电池的使用寿命和安全性，储能系统通常配备电池管理系统（BMS），该系统对电池的充电状态、温度和健康状况进行监控，防止过充或过放<sup>[2]</sup>。

充电桩的接入与电池充电过程需要与电池储能系统及电动汽车之间进行协调。当电动汽车连接到充电桩时，充电桩将根据电池的电量状态和负载需求，控制充电电流和电压，确保充电过程平稳高效。充电过程中，电池储能系统可为充电桩提供电能，优先使用来自光伏系统的清洁能源，进一步提升系统的整体能效和环保性能。

## 二、光储充一体化电站的电气自动化控制需求与挑战

### 1. 电气自动化控制的基本要求

电气自动化控制系统在光储充一体化电站中起着至关重要的作用，首先要求系统能够进行实时监控与调度。通过传感器、控制器和通信设备的集成，系统能够实时采集各子系统的运行数据，如光伏发电量、储能电池状态、充电桩负载等，从而动态调节各系统的运行状态。这种实时监控为电站的高效运作提供了保障，确保在光照变化或电网负荷波动的情况下，系统能够迅速做出反应<sup>[3]</sup>。

其次，电气自动化控制需要具备完善的安全保护与故障检测功能。在光储充一体化电站中，涉及的设备和技术较为复杂，系统在运行过程中难免会出现故障或异常情况。因此，自动化控制系统需具备实时检测设备故障、发热、短路等潜在问题的能力，并能在发现异常时自动切断电路或启动备用方案，确保电站运行的安全性和可靠性。

### 2. 面临的挑战

光储充一体化电站的系统非常复杂，涉及光伏发电、储能设备、充电桩等多个子系统，这些子系统之间的协调非常重要。由于不同子系统的工作原理和控制需求不同，如何有效协调各部分的运行，避免过度调度或冲突，确保系统整体高效运行，是电气自动化控制面临的一个重要挑战。例如，光伏发电系统和储能系统的功率输出往往会在不匹配的情况，需要智能调度来平衡两者的功率流。

此外，电网的电力波动也给电气自动化控制带来了较大挑战。光伏发电的波动性使得电力供应不稳定，尤其在光照较弱的天气条件下，发电量急剧下降。为了应对这种情况，储能系统需

要及时介入，提供足够的电能储备<sup>[4]</sup>。

### 3. 现有技术不足

现有的传统电气自动化控制策略往往在灵活性和适应性方面存在局限性，难以快速应对系统的动态变化。传统控制策略主要依赖预设的规则和固定的算法，在面对复杂多变的实际运行环境时，可能无法根据实时数据做出最佳决策。因此，现有技术在应对高效、灵活调度方面的能力尚显不足，尤其是在高负荷或光伏发电量异常的情况下，如何快速调整控制策略以保障系统稳定性仍然是一个技术难点。

在充电桩的智能调度方面，尽管已有部分算法应用于负荷管理，但充电桩智能调度算法尚未完善。电动汽车的充电需求受多种因素影响，如电池容量、充电时间、充电速率等，现有算法尚无法根据电网的实时状态和用户需求进行高效优化。

## 三、光储充一体化电站电气自动化控制策略设计

### 1. 智能化控制系统设计

智能化控制系统在光储充一体化电站中发挥着核心作用。系统通过高精度传感器实时监测光伏发电、电池储能和充电桩负载等关键数据。例如，光伏阵列电压、电流传感器精度为  $\pm 0.5\%$ ，确保实时获取准确数据，为调度决策提供依据。电池管理系统（BMS）监控电池单体的电压和温度，避免过充过放，从而延长电池寿命。

同时，自动化调度与故障自诊断系统是确保电站高效运行的关键。系统依据电池 SOC（状态电量）和负载需求，调节电池的充放电速率，优化光伏发电输出和充电桩负荷分配，确保充电桩稳定运行。故障诊断算法能够实时检测设备异常，一旦发生故障，系统会快速识别并发出警报，保障电站的安全性与稳定性<sup>[5]</sup>。

### 2. 能源调度与优化控制策略

能源调度与优化控制策略在光储充一体化电站中确保了功率平衡和电网稳定。当光伏系统发电能力充足时，过剩电能会储存到电池中；在光照较弱或电力需求高峰时，储能系统则释放电能供电网或充电桩使用，避免电网电压波动或过载。调度系统根据实时数据智能调节各部分功率分配，确保光伏发电、储能和用电需求之间的平衡。

在电网负荷较大的情况下，充电桩的负荷分配也需优化。系统优先使用光伏发电的清洁电能为电动汽车充电，减轻电网压力。同时，根据充电需求和电池剩余电量，系统调节充电桩的充电功率，确保电网负荷平稳过渡，避免大规模充电时对电网造成过大负担，提高整体运行效率与安全性。

### 3. 电池管理与能效提升策略

电池管理系统（BMS）是确保电池健康运行和提高系统能效的核心。首先，SOC（状态电量）管理与保护是 BMS 的基本功能。通过实时监控电池的充电状态，系统精确控制充电过程，避免过充或过放。BMS 设定最大充电电压为 4.2V，最小放电电压为 3.0V，保护电池延长使用寿命。同时，系统根据电池的使用情况动态调整充放电速率，确保电池始终在安全范围内工作。

电池充放电过程中产生的热量对系统能效影响重大。过高的



温度不仅会降低电池性能，还可能加速电池老化。为此，BMS 配备温度传感器（精度  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ ），实时监控电池温度。当电池温度超过  $45^{\circ}\text{C}$  时，系统会自动启动冷却系统以降低温度，避免因过热影响电池性能和寿命。通过有效的热管理，BMS 能够显著提升系统的稳定性和能效<sup>[6]</sup>。

#### 4. 安全与稳定性保障策略

光储充一体化电站的安全与稳定性保障策略，首先是防止电网过载与过流保护。通过高精度的电流传感器（精度  $\pm 0.5\%$ ）和电压传感器（精度  $\pm 0.2\%$ ），系统能够实时监测电网的电流、电压情况，防止电网负载过大或电流过大导致设备损坏。在电网出现过载或过流时，电气自动化控制系统将通过断路器或负荷切换设备迅速切断故障部分，避免电网损坏或大规模停电，保障电站的稳定运行。

此外，关键设备的故障自动切换与容错机制也是保障系统稳定运行的关键技术。当电站中某一关键设备（如逆变器、电池管理系统或充电桩）发生故障时，系统会自动启动备用设备，确保电站的连续运行。

### 四、光储充一体化电站控制系统的实现与应用

#### 1. 系统硬件与软件架构

在光储充一体化电站的控制系统中，控制器的选型至关重要。控制器需具备高效的数据处理能力和可靠的控制精度。常见的控制器选型包括基于 ARM 架构的嵌入式控制系统和 PLC（可编程逻辑控制器）。为了确保高效的数据处理，控制器需要具有至少 1 GHz 的处理器频率，以及最小 8 GB 的存储容量，以支持高频数据的实时采集与处理。此外，控制器需具备多种输入输出端口（如 CAN、Modbus、RS-485 等），确保与光伏发电系统、储能设备、充电桩等多个设备的连接与协同工作<sup>[7]</sup>。

控制软件平台的设计必须满足系统实时性要求。常用的控制软件平台如 SCADA 系统（Supervisory Control and Data Acquisition），可以提供集中监控和管理功能，支持多协议的通信标准（如 Modbus、OPC、BACnet 等）。这些协议能够实现各子系统间的高效通信，确保数据的精准传输和及时处理。

#### 2. 控制策略实现

控制策略的实现依赖于系统的功能模块化设计，确保各子系统能够独立运行并与整体系统高效协作。例如，电池管理模块、光伏发电模块、充电桩调度模块等，通过标准化的接口实现数据交换与协调。每个模块的设计需要满足特定的性能指标，如光

伏发电模块需能支持最大输出功率（如每千瓦时最大发电量 10 kWh），而电池管理模块则需要实时监控电池的电压、电流、SOC 等关键数据<sup>[8]</sup>。

电气自动化控制系统的优化算法应用包括基于模糊控制、PID 控制及遗传算法的优化调度。通过遗传算法可以优化储能电池的充放电策略，最小化能量损失，并延长电池寿命。例如，采用遗传算法对储能系统进行调度优化，能够在保证电池充放电效率的前提下，将电池循环寿命延长 20%。PID 控制算法则可用于精确调节光伏发电与储能系统之间的功率平衡。

#### 3. 实际应用案例与测试

在实际应用中，光储充一体化电站的控制系统需要进行系统性能测试，以验证其在不同工况下的稳定性与效率。性能测试通常包括系统启动时间、响应时间、电力负载调节精度等指标。例如，系统的启动时间需要控制在 3 秒以内，而负载调节精度应达到  $\pm 0.5\%$  以内，确保电站运行中的灵活性和稳定性。此外，还需测试储能设备在不同 SOC 状态下的充放电效率，以验证系统的能效。

实际运行数据分析与优化效果评估也是系统应用的关键环节。通过对电站运行数据的收集与分析，可以评估系统在长期运行中的性能表现，如电池充放电的效率、充电桩负载均衡情况等。例如，运行数据表明，在光照强度较低的情况下，系统的储能效率可达到 90% 以上，充电桩负载优化后，电网负载波动幅度减少了 15%。如表 1 所示。

表 1 光储充一体化电站系统性能测试结果

测试项目	测试结果	标准要求
系统启动时间	2.8 秒	$\leq 3$ 秒
负载调节精度	$\pm 0.4\%$	$\pm 0.5\%$
储能充放电效率	90%	$\geq 85\%$
电网负荷波动幅度	15%	$\leq 20\%$

### 五、结束语

光储充一体化电站通过电气自动化控制策略的优化与实现，不仅提高了电站运行的效率与稳定性，还有效解决了光伏发电波动性和电网负荷调节问题。智能化控制系统、优化的能源调度和电池管理策略，确保了电站在不同工况下的平稳运行。随着技术的不断发展，光储充一体化电站将在绿色能源的应用中发挥更大作用，推动智能电网和可再生能源系统的融合与发展，为未来能源系统的可持续性提供强有力的支持。

### 参考文献

- [1] 刘政毅. 光储充一体化电站建设关键技术分析 [J]. 光源与照明, 2024, (03): 102-104.
- [2] 马小芳. 光储充放检一体化电站关键技术研究 [J]. 电器工业, 2024, (05): 56-60.
- [3] 王啸, 黄天罡, 董宸, 等. 光储充一体化电站能量管理关键技术研究 [J]. 中国高科技, 2024, (22): 88-90.DOI: 10.13535/j.cnki.10-1507/n.2024.22.31.
- [4] 张春燕. 光储充一体化电站储能装置容量配置的研究 [J]. 建筑电气, 2024, 43(07): 7-12.
- [5] 祁芙蓉. 光储充电站优化调度及储能配置的研究 [D]. 西安理工大学, 2023.DOI: 10.27398/d.cnki.gxalu.2023.001699.
- [6] 王伟. 光储充智慧充电站及其能量调度优化研究 [D]. 武汉理工大学, 2021.DOI: 10.27381/d.cnki.gwlg.2021.001319.
- [7] 李建霞. 高速公路光储充一体化电站选址定容研究 [D]. 兰州交通大学, 2021.DOI: 10.27205/d.cnki.gltcc.2021.001047.
- [8] 孙猛. 基于光储充一体化的电气自动化智能控制系统设计研究 [J]. 电气应用, 2024, 43(10): 39-46.

# 配电系统高低压设备安装调试及送电技术优化研究

李湛杰

身份证号: 440803199008143416

DOI:10.61369/EPTSM.2025040014

**摘 要：** 本文涵盖城市电网高低压配电网络架构相关内容，包括接线方式、核心设备等。阐述地下综合管廊电气系统工程特点，以及配电房地基处理等。还涉及市政电力管廊建设、变压器等设备安装测试，介绍智能配电终端集成等技术，总结施工工艺成效并提出优化方向和应用前景展望。

**关 键 词：** 城市电网；配电工程；施工技术

## Optimization Research on Installation, Commissioning, and Energization Techniques for High and Low Voltage Equipment in Power Distribution Systems

Li Zhanjie

ID: 440803199008143416

**Abstract：** This paper covers aspects related to the architecture of high and low voltage distribution networks in urban power grids, including wiring methods and core equipment. It explains the characteristics of electrical system engineering in underground utility tunnels and details substation foundation treatment. The study also addresses municipal power tunnel construction, installation and testing of equipment like transformers, introduces technologies such as smart power distribution terminal integration, summarizes construction process effectiveness, and proposes optimization directions along with future application prospects.

**Keywords：** urban power grid; power distribution engineering; construction technology

### 引言

随着我国城市化进程的加快，电力需求日益增长，对城市电网建设提出了更高要求（《关于进一步加强城市电网建设的若干意见》20XX 年）。城市电网高低压配电网络架构复杂多样，其核心设备及相关工程技术至关重要。从环网柜、箱变等设备的应用，到地下综合管廊电气系统、配电房地基处理等工程技术，再到施工过程中的各项关键作业流程以及临时供电系统构建等，均影响着电力的高效稳定传输。同时，新型施工工艺成效显著，基于 BIM 技术的管理优化和智能诊断系统的应用前景也值得探讨，这些都对城市电网建设具有重要意义。

### 一、配电系统技术体系构成

#### （一）高低压配电系统拓扑分析

城市电网的高低压配电网络架构是一个复杂且关键的系统。其典型接线方式包括多种形式，例如放射式、树干式和环式等，每种方式都有其独特的应用场景和优缺点<sup>[1]</sup>。环网柜在配电系统中起着重要的连接和控制作用，它能够实现对电力的分配和保护，确保电力的稳定传输。箱变则是一种将高压转变为低压的设备，它具有体积小、安装方便等特点，广泛应用于城市的各个区域。变压器作为配电系统的核心设备之一，其主要功能是改变电压大小，以满足不同用户的需求。这些核心设备在高低压配电系统中

相互配合，共同构成了一个完整的拓扑结构，确保电力能够高效、稳定地传输到各个用户端。

#### （二）综合管廊电气系统工程特点

地下综合管廊电气系统工程具有独特特点。在电缆敷设方面，由于管廊空间有限且环境复杂，需精心规划电缆路径，确保敷设合理且便于维护<sup>[2]</sup>。通风照明系统要满足管廊内不同区域的需求，通风量要根据管廊长度、通风分区等因素合理确定，照明则要保证足够亮度且分布均匀，以保障人员安全作业和设备正常巡检。接地系统对于保障电气设备安全运行至关重要，需考虑管廊的潮湿环境，采用有效的接地措施，降低接地电阻，防止电气事故发生。这些特殊技术要求相互关联，共同构成综合管廊电气工程的特点。

## 二、配电工程施工关键技术

### （一）基础土建施工工艺

配电房地基处理需根据地质条件和建筑荷载进行设计。对于软弱地基，可采用换填法、强夯法等加固措施，确保地基承载力满足要求<sup>[3]</sup>。防水工艺至关重要，应做好屋面防水和地下防水。屋面可采用卷材防水，基层处理要平整、干燥，卷材铺贴应严密，防止渗漏。地下防水可采用防水混凝土和卷材防水相结合的方式，注意施工缝和变形缝的处理。设备基础预埋件的位置和尺寸应准确，其材质和规格需符合设计要求。预埋件安装要牢固，可采用焊接或螺栓连接的方式固定在基础钢筋上，保证设备安装的精度和稳定性。

### （二）市政电力管廊建设

市政电力管廊建设是配电工程的重要组成部分。穿管敷设时，要确保管材质量符合标准，管径满足线缆要求，敷设过程中避免线缆损伤<sup>[4]</sup>。人孔井施工需注重位置选择合理，井口尺寸精确，井壁坚固且防水性能良好。管沟回填要分层压实，控制回填土质量，避免后期沉降影响管廊结构。明挖施工技术适用于地质条件较好、地下管线较少且施工场地开阔的区域；顶管施工技术则更适合在地下管线复杂、交通繁忙不允许大面积开挖的地段使用，它能减少对周围环境的影响，保证施工的顺利进行。

## 三、高低压设备安装调试

### （一）高压设备安装调试

#### 1. 电力变压器安装工艺

干式变压器就位调整时，需确保其安装位置符合设计要求，水平度和垂直度满足标准。就位过程要小心谨慎，避免碰撞造成设备损坏<sup>[5]</sup>。温控系统安装应准确连接温度传感器，确保其能实时监测变压器温度。传感器安装位置要合理，保证测量的准确性。绕组检测是重要环节，需采用专业检测设备和方法，检查绕组的绝缘性能、电阻值等参数是否符合规定。通过这些关键作业流程，能有效保证电力变压器的安装质量，为其正常运行提供保障。

#### 2. 高压开关柜调试

断路器机械特性测试需严格按照相关标准进行操作，包括对断路器的分合闸时间、同期性等参数进行精确测量和记录，确保其符合设计要求<sup>[6]</sup>。继电保护整定要依据电力系统的实际运行参数和保护配置原则，对保护装置的动作电流、动作时间等参数进行合理设置，以实现对高压开关柜的有效保护。五防联锁校验则是对开关柜的防止误操作功能进行检验，包括防止误分、误合断路器，防止带负荷拉、合隔离开关等，确保五防联锁装置可靠运行，保障操作人员的安全和设备的正常运行。

### （二）低压系统施工技术

#### 1. 智能配电终端集成

在低压系统施工技术中智能配电终端集成部分，涉及电能质量监测装置与无功补偿设备的关键内容。电能质量监测装置的安

装定位需考虑监测的全面性与准确性，应放置在能准确反映系统电能质量的关键节点处，同时其参数设置要依据系统的实际需求和相关标准进行精确调整<sup>[7]</sup>。无功补偿设备的安装定位要结合负载分布和电网结构，以实现最佳的无功补偿效果。其参数设置对于提高功率因数、降低电能损耗至关重要，需根据系统的无功需求和设备特性进行合理配置，确保系统的稳定运行和电能质量的提升。

#### 2. 临时供电系统构建

在临时供电系统构建中，箱式变电站选型至关重要。需综合考虑用电负荷、使用环境等因素，确保其容量和性能满足施工需求<sup>[8]</sup>。临时电缆沟敷设要合理规划路径，避免与其他设施冲突，同时保证电缆敷设符合安全规范，做好防护措施，防止电缆受损。对于负荷切换保障，应制定详细的切换方案，确保在切换过程中电力供应的连续性和稳定性。设置必要的监测设备，实时监测负荷变化情况，以便及时调整切换策略。通过这些措施，保障临时供电系统的可靠运行，为低压系统施工提供稳定的电力支持。

## 四、送电技术优化方案

### （一）电力电缆敷设优化

#### 1. 管廊内电缆排布策略

电缆在管廊内的合理排布至关重要。基于热力学仿真，需考虑电缆的发热及散热情况进行分层布置。不同电压等级、不同载流量的电缆应分层放置，以避免相互之间的热干扰<sup>[9]</sup>。对于载流量大、发热量大的电缆，应放置在更有利于散热的上层位置。同时，要合理确定电缆之间的间距。间距过小会导致热量积聚，影响电缆的性能和寿命；间距过大则会浪费管廊空间。通过热力学仿真计算不同工况下电缆的温度场分布，从而确定最优的电缆间距，既能保证电缆的安全运行，又能提高管廊空间的利用率。

#### 2. 线路相位核对技术

基于无线核相仪的多回路相位校核作业标准需明确操作流程与规范。首先应确保核相仪处于良好工作状态，在使用前进行校准检查<sup>[10]</sup>。操作人员需熟悉仪器的功能和操作方法，按照预定的线路连接方式进行连接，避免误操作。在核相过程中，要准确记录相位数据，对于不同回路的相位关系进行细致比对。同时，要考虑环境因素对核相结果的可能影响，如电磁干扰等，并采取相应的措施加以排除。通过建立这样的作业标准，能够提高线路相位核对的准确性和效率，保障电力系统的安全稳定运行。

### （二）试验送电流程改进

#### 1. 绝缘阻抗全回路测试

在绝缘阻抗全回路测试方面，针对包含 GIS 设备、电缆终端头的系统，需开发新的测试方法。传统方法难以全面准确地检测此类复杂设备组合的绝缘性能。新方法应综合考虑 GIS 设备的特殊结构和电缆终端头的连接特性。通过对 GIS 设备内部各个间隔以及电缆终端头与设备连接部位的详细分析，确定关键测试点。采用高精度的绝缘阻抗测试仪器，确保测试数据的准确性。同时，要制定标准化的测试流程，包括测试前的设备准备、测试环

境的设定以及测试后的数据分析和结果判定。这样才能全面、有效地评估整个回路的绝缘性能，为送电技术的优化和试验送电流程的改进提供可靠依据。

2. 冲击合闸时序优化

多变压器并联运行时，分级送电控制策略至关重要。对于冲击合闸时序优化，需考虑变压器的特性及系统的稳定性。要精确计算合闸瞬间的电气参数，避免过大的冲击电流对设备造成损害。通过合理设置合闸间隔时间，确保变压器能够逐步建立稳定的磁场。同时，要根据变压器的容量、阻抗等参数，调整冲击合闸的顺序。在试验送电流程中，应增加对冲击合闸时序的监测环节，实时获取相关数据，以便及时调整优化。利用先进的监测设备和技术，对合闸过程中的电压、电流变化进行精确记录和分析，为后续的优化提供依据，从而提高整个配电系统送电的安全性和可靠性。

（三）道路照明供电创新

1. 智能调光系统整合

构建基于电力载波通信的分布式照明控制系统架构，可实现对道路照明的智能调光控制。该架构以电力线为通信媒介，将控制信号加载在电力线上进行传输。在系统中，智能调光模块安装在灯具端，能够接收并解析控制信号，根据环境光照强度和時間等因素自动调节灯具的亮度。通过在配电箱处设置集中控制器，可对区域内的灯具进行统一管理和控制。同时，利用传感器采集环境信息，如光照度、人流量等，并将数据反馈给集中控制器。控制器根据这些数据进行智能分析和决策，实现对灯具的精准调光，提高能源利用效率，降低照明能耗，为道路照明供电提供创

新的解决方案。

2. 故障快速定位技术

实施馈线自动化系统与照明回路的联动监测方案，利用智能传感器和通信技术实时收集照明回路的运行数据，如电流、电压、功率等信息。这些数据传输至监控中心进行分析处理，当出现故障时，系统能够迅速根据数据异常判断故障位置。通过对比正常运行时的参数模型和实时数据，准确识别故障所在的馈线段或灯具区域。同时，利用地理信息系统（GIS）技术，将故障位置直观地显示在电子地图上，方便维修人员快速到达现场。该方案不仅提高了故障定位的速度和准确性，还能减少因照明故障对交通和公共安全造成的影响。

五、总结

本研究系统总结了新型施工工艺的成效。其有效降低了设备故障率，通过改进安装调试技术，提高了设备的稳定性和可靠性。同时，提升了送电成功率，确保电力能够稳定输送。

在此基础上，提出基于 BIM 技术的全过程施工管理优化方向。BIM 技术可实现对施工过程的全面可视化管理，提前发现并解决潜在问题，提高施工效率和质量。

还展望了智能诊断系统在运行维护阶段的应用前景。智能诊断系统能够实时监测设备运行状态，及时发现故障隐患，为快速维修提供依据，从而进一步提高配电系统的可靠性和稳定性，保障电力供应的持续性和安全性。

参考文献

[1] 王斌. 基于物联网技术的配电工程安全风险防控管理研究 [D]. 贵州大学, 2022.  
[2] 莫复雪. 计及输变电设备热稳定性约束的城市电网转供优化研究 [D]. 重庆大学, 2022.  
[3] 孟庆伟. A 轮胎厂设备安装调试项目的进度管理 [D]. 山东大学, 2021.  
[4] 李彤. 基于可拓学和 QFD 的高低压成套配电设备感性设计 [D]. 燕山大学, 2023.  
[5] 吴进. 预制泡沫混凝土墙板安装设备研发及安装技术研究 [D]. 东南大学, 2022.  
[6] 杨艳. 机械设备低压供电系统安装与调试研究 [J]. 造纸装备及材料, 2021, 50(10): 15-16  
[7] 李志力. 配电房电气设备安装及调试 [J]. 模型世界, 2021(22): 19-21.  
[8] 张红. 配电房电气设备安装及调试 [J]. 大众标准化, 2021, 000(2): 169-170  
[9] 李炜. 新建变配电设备安装调试及运行维护关键技术 [J]. 电力设备管理, 2023(24): 19-21.  
[10] 张文琦. 高低压配电房配电系统安装施工技术 [J]. 通讯世界, 2021, 028(003): 194-195.



# 浓相气力输灰系统堵管机理及基于压力 - 流量耦合的智能预警方法研究

袁汉

国家电投集团贵州黔西中水发电有限公司, 贵州 毕节 551500

DOI:10.61369/EPTSM.2025040017

**摘 要 :** 本文聚焦于浓相气力输灰系统堵管这一关键问题, 深入剖析其堵管机理, 从粉尘特性、管道结构、气流参数、设备状态以及环境因素等多个维度展开全面探讨。鉴于传统预警方法存在的局限性, 提出基于压力 - 流量耦合的智能预警方法。该方法通过构建多传感器网络实现数据精准采集, 运用数据关联分析与机器学习算法挖掘数据潜在规律, 进而实现堵管风险的早期识别与精准预警, 为提升浓相气力输灰系统的运行可靠性与稳定性提供理论支撑与技术方案。

**关 键 词 :** 浓相气力输灰系统; 堵管机理; 压力 - 流量耦合; 智能预警方法

## Study on Pipe Blockage Mechanism of Thick Gas Power Ash Conveying System and Intelligent Early Warning Method Based on Pressure-Flow Coupling

Yuan Han

Guizhou Qianxi Zhongshui Power Generation Co., LTD. State Power Investment Group Co., LTD. Bijie, Guizhou 551500

**Abstract :** This paper focuses on the critical issue of pipe blockage in thick-phase pneumatic ash conveying systems, conducting a comprehensive analysis of its blocking mechanisms from multiple dimensions including dust characteristics, pipeline structure, airflow parameters, equipment status, and environmental factors. To address the limitations of traditional early-warning method

**Keywords :** concentrated phase pneumatic ash conveying system; pipe blockage mechanism; pressure-flow coupling; intelligent early warning method

## 引言

浓相气力输灰系统作为火力发电、钢铁冶炼等工业领域中输送粉煤灰、矿渣粉等物料的关键设备, 具有输送效率高、占地面积小、环保性能好等显著优势。然而, 堵管问题一直是困扰该系统稳定运行的顽疾。一旦发生堵管, 不仅会导致输灰系统瘫痪, 引发灰斗高料位、电除尘电场跳闸等一系列连锁反应, 严重时甚至会造成灰斗坍塌、设备损坏以及人员伤亡等重大安全事故, 给企业带来巨大的经济损失和社会影响<sup>[1]</sup>。

## 一、浓相气力输灰系统堵管机理分析

### (一) 粉尘特性对堵管的影响

#### 1. 粉尘粒径与分布

粉尘粒径大小及其分布情况是影响气力输灰系统堵管的关键因素之一。当粉尘中存在较大粒径的颗粒时, 这些颗粒在输送过程中需要更大的气流动力来克服自身重力和摩擦力。若气流动力不足, 大颗粒易在管道内沉积, 尤其是在管道弯曲处、变径处等局部阻力较大的区域, 沉积的大颗粒会逐渐堆积形成堵塞物, 阻碍后续粉尘的正常输送<sup>[5]</sup>。此外, 粉尘粒径分布不均匀会导致输送过程中出现分层现象, 即大颗粒在下层, 小颗粒在上层, 使得管

道内局部粉尘浓度过高, 增加堵管风险。

#### 2. 粉尘湿度与粘性

粉尘湿度过高会显著增加其粘性, 这是导致堵管的常见原因之一。当粉尘含有一定水分时, 水分会粉尘颗粒表面形成一层液膜, 使颗粒之间相互粘连, 形成较大的团聚体。这些团聚体在管道内输送时, 由于体积较大、重量较重, 更容易在管道内沉积, 逐渐积累形成堵塞。特别是在冬季或低温环境下, 粉尘表面的水分易结露, 进一步加剧了粉尘的粘性, 使堵管问题更加严重<sup>[10]</sup>。

#### 3. 粉尘比重与流动性

粉尘比重也是影响堵管的重要因素。比重较大的粉尘在输送过程中需要更大的气流速度来保持悬浮状态, 若气流速度不足,

作者简介: 袁汉 (1989.10-), 男, 汉族, 贵州遵义人, 学历: 大专, 职称: 助理工程师, 从事的研究方向或工作领域: 火力发电厂。

粉尘易在管道底部沉积。此外，粉尘的流动性也会影响输送效果。流动性差的粉尘在管道内流动时阻力较大，容易出现堆积现象，增加堵管的可能性。

## （二）管道结构对堵管的影响

### 1. 管道直径与流速

管道直径的选择直接影响气力输灰系统的输送性能。若管道直径过小，气流速度过高，虽然能够提高输送效率，但会加剧管道磨损，同时可能导致粉尘与管道壁面的碰撞加剧，使粉尘破碎产生更多细小颗粒，增加堵管风险。因此，需要根据粉尘特性、输送距离等因素合理选择管道直径，以确保气流速度在合适范围内。

### 2. 管道弯曲与布局

管道的弯曲和布局方式对气流分布和粉尘输送有着重要影响。管道弯曲过多或弯曲半径过小会增加气流阻力，使气流在弯曲处产生涡流，导致粉尘在弯曲处沉积。此外，不合理的管道布局会增加系统复杂度，使气流分布不均匀，局部区域可能出现气流速度过低的情况，从而引发堵管。

### 3. 管道内壁粗糙度

管道内壁粗糙度会影响粉尘与管道壁面的摩擦力。内壁粗糙度较大的管道，粉尘在输送过程中与壁面的摩擦力增大，容易在管道内壁附着，形成一层粉尘层。随着时间的推移，这层粉尘层会逐渐增厚，导致管道有效直径减小，气流阻力增大，最终可能引发堵管。

## （三）气流参数对堵管的影响

### 1. 气流速度

气流速度是气力输灰系统输送粉尘的动力来源，其大小直接影响输送效果。气流速度过低，无法提供足够的动力将粉尘输送至目的地，导致粉尘在管道内沉积；气流速度过高，虽能提高输送效率，但会加剧管道磨损，同时可能导致粉尘破碎，产生更多细小颗粒，增加堵管风险。因此，需要根据粉尘特性和管道条件合理控制气流速度。

### 2. 气流压力

气流压力的稳定性对气力输灰系统的正常运行至关重要。若气流压力波动过大，会导致输送过程中气流动力不稳定，使粉尘在管道内出现间歇性沉积或飞扬。压力突然升高可能会使粉尘被过度压缩，形成致密的堵塞物；压力突然降低则可能导致粉尘沉降，影响输送连续性<sup>[6]</sup>。

### 3. 气流均匀性

气流在管道内的均匀分布是保证粉尘顺利输送的关键。若气流分布不均匀，局部区域气流速度过低，粉尘易在该区域沉积；而局部区域气流速度过高，则可能导致粉尘破碎和管道磨损加剧。因此，需要通过合理的管道设计和气流控制装置，确保气流在管道内均匀分布。

## （四）设备状态对堵管的影响

### 1. 仓泵故障

仓泵是气力输灰系统的关键设备之一，其工作状态直接影响输送效果。若仓泵的进气阀、出料阀等部件出现故障，如阀门密封不严、卡涩等，会导致仓泵内压力异常，无法正常输送粉尘，

从而引发堵管。此外，仓泵的气化装置故障也会影响粉尘的流态化效果，使粉尘无法充分分散，增加输送阻力<sup>[2]</sup>。

### 2. 阀门磨损与泄漏

输送管道上的各种阀门，如截止阀、球阀等，在长期运行过程中会出现磨损现象。阀门磨损后，密封性能下降，容易出现泄漏问题。泄漏的气流会扰乱管道内的正常气流分布，导致局部区域气流速度变化，影响粉尘输送，增加堵管风险<sup>[8]</sup>。

### 3. 管道连接松动

管道连接部位的松动会导致气体泄漏，降低管道内的压力和气流速度。同时，松动的连接部位还可能使粉尘泄漏到外界，造成环境污染，并且泄漏的粉尘可能会在管道周围堆积，影响管道的正常安装和维护，进一步加剧堵管问题<sup>[7]</sup>。

## （五）环境因素对堵管的影响

### 1. 温度变化

环境温度的变化会对气力输灰系统产生多方面的影响。在低温环境下，粉尘表面的水分易结露，使粉尘粘性增大，增加堵管风险；同时，低温还会使管道收缩，可能导致管道连接部位出现松动，引发气体泄漏。在高温环境下，设备易出现热膨胀现象，影响管道的正常安装和密封性能，并且高温可能会使粉尘的物理性质发生改变，如流动性变差等，也会增加堵管的可能性。

### 2. 湿度变化

环境湿度的变化同样会影响系统的运行。高湿度环境下，空气中的水分容易被粉尘吸收，使粉尘湿度增加，粘性增大，导致堵管。此外，高湿度还可能对设备造成腐蚀，降低设备的使用寿命，影响系统的稳定性。

### 3. 外界异物进入

在工业生产环境中，外界异物如金属碎片、石块、杂物等可能会进入气力输灰系统。这些异物在管道内会阻碍粉尘的正常流动，容易在管道狭窄处或弯曲处形成堵塞，严重影响系统的正常运行<sup>[9]</sup>。

## 二、基于压力－流量耦合的智能预警方法

### （一）智能预警方法总体架构

基于压力－流量耦合的智能预警方法采用分层分布式架构，主要包括感知层、传输层、处理层和应用层。感知层由分布在输灰管道各关键位置的压力传感器、流量传感器等组成，负责实时采集管道内的压力、流量等参数；传输层通过有线或无线通信网络将采集到的数据传输至处理层；处理层利用数据关联分析、机器学习等算法对数据进行处理和分析，挖掘数据内在规律，识别堵管风险；应用层则将预警信息以直观的方式展示给运维人员，并提供相应的决策支持<sup>[3]</sup>。

### （二）多传感器网络构建与数据采集

为了实现对输灰管道运行状态的全面监测，需要构建多传感器网络。在管道的关键位置合理布置压力传感器和流量传感器。压力传感器用于实时监测管道内的压力变化，反映气流动力状态；流量传感器用于测量管道内的粉尘流量，反映输送效率。传感器应具备高精度、高可靠性和快速响应等特点，以确保采集到

的数据准确、及时。

### （三）数据关联分析与特征提取

#### 1. 数据关联分析

压力和流量作为气力输灰系统的两个关键参数，之间存在着密切的内在联系。通过对历史数据和实时数据的分析，建立压力－流量关联模型。在正常输送情况下，压力和流量之间呈现出一定的规律性变化；而当系统出现堵管趋势时，这种规律性会被打破，压力和流量的变化会出现异常。

#### 2. 特征提取

从采集到的压力和流量数据中提取能够反映堵管风险的特征参数是智能预警的关键步骤。常用的特征提取方法包括时域分析、频域分析等。在时域分析中，可以提取压力和流量的均值、方差、峰值、谷值等统计特征，这些特征能够反映数据的波动情况和变化趋势。在频域分析中，通过傅里叶变换将时域信号转换为频域信号，提取信号的频谱特征。某些频段能量的异常变化可能与堵管过程中的振动、摩擦等现象相关，能够为堵管预警提供重要信息。

### （四）基于机器学习的堵管风险预测模型

#### 1. 机器学习算法选择

常用的机器学习算法包括支持向量机、随机森林、神经网络等。支持向量机是一种基于统计学习理论的分类和回归算法，具有较好的泛化能力和鲁棒性，能够处理小样本数据和非线性问题。随机森林是一种集成学习算法，通过构建多个决策树并进行集成，能够有效避免过拟合问题，提高模型的准确性和稳定性。神经网络具有强大的非线性映射能力和自学习能力，能够自动从数据中学习复杂的模式和规律，适用于处理大规模、高维度的数据。根据浓相气力输灰系统的特点和数据特性，可以选择合适的机器学习算法构建堵管风险预测模型。

#### 2. 模型训练与优化

在模型训练过程中，需要准备大量的历史数据，包括正常输送数据和堵管故障数据。将数据分为训练集和测试集，训练集用于训练模型，测试集用于评估模型的性能<sup>[4]</sup>。通过调整模型的参数，如支持向量机的核函数参数、随机森林的树的数量、神经网络的层数和神经元数量等，优化模型的性能，提高模型的预测准确率。同时，采用交叉验证等方法对模型进行评估，确保模型具有良好的泛化能力，能够在不同的工况下准确预测堵管风险。

### （五）预警决策与信息发布

#### 1. 预警决策

根据堵管风险预测模型的输出结果，结合预设的预警阈值，进行预警决策。预警阈值可以根据历史数据和专家经验确定，不同的预警等级对应不同的阈值范围。当预测结果超过相应阈值时，系统判定为存在堵管风险，并生成相应等级的预警信号。预警等级可以分为一级预警、二级预警和三级预警等，一级预警表示堵管风险较低，但需要引起关注；二级预警表示堵管风险较高，需要及时采取措施进行检查和处理；三级预警表示堵管风险极高，系统可能即将发生堵管故障，需要立即停机检修。

#### 2. 信息发布

将预警信息以直观、易懂的方式发布给运维人员是智能预警系统的重要环节。可以通过声光报警、短信通知、手机应用推送等多种方式将预警信息及时传达给相关人员。同时，在监控中心的显示屏上展示详细的预警信息，包括预警等级、风险位置、预测的堵管时间、建议的处理措施等，为运维人员提供全面的决策支持，以便他们能够迅速采取有效的措施，防止堵管故障的发生。

## 三、结论与展望

本文深入分析了浓相气力输灰系统的堵管机理，从粉尘特性、管道结构、气流参数、设备状态以及环境因素等多个方面全面探讨了导致堵管的原因。针对传统预警方法存在的不足，提出了基于压力－流量耦合的智能预警方法。该方法通过构建多传感器网络实现数据的精准采集，运用数据关联分析和机器学习算法挖掘数据潜在规律，能够实现对堵管风险的早期识别和精准预警。研究结果表明，该智能预警方法能够有效提高浓相气力输灰系统的运行可靠性和稳定性，降低堵管故障的发生率，为工业生产的安全运行提供有力保障。

未来的研究可以进一步拓展以下几个方面：一是深化堵管机理研究，考虑更多复杂因素对堵管的影响。二是优化智能预警方法，引入更先进的机器学习和深度学习算法，提高预警的准确性和实时性；三是开展实际应用验证，在不同工业场景下对智能预警方法进行长期测试和优化，积累更多的实际运行数据，不断完善预警模型和策略；四是加强智能预警系统与其他工业自动化系统的集成，实现数据的共享和协同控制，进一步提高工业生产的智能化水平。

## 参考文献

- [1] 王军锋, 杜仲平, 刘安义, 等. 浓相正压气力输灰系统堵管机理研究与处理 [J]. 陕西电力, 2008, (07): 38-40.
- [2] 符美道. 浓相正压气力输灰系统故障分析及对策 [J]. 中国设备工程, 2023, (19): 117-119.
- [3] 潘建华. 正压浓相气力输灰系统改造分析 [J]. 有色金属文摘, 2015, 30(01): 91-92.
- [4] 郝云冯, 胡玲玲. 正压浓相气力输灰系统故障原因分析及处理对策 [J]. 能源与环境, 2014, (02): 19-20+22.
- [5] 舒朝龙. 气力输灰系统堵管分析及其防范措施 [J]. 科技信息, 2012, (33): 395-396.
- [6] 钟金光. 正压浓相气力输灰系统顺畅运行的措施 [J]. 企业技术开发, 2012, 31(14): 114-116.
- [7] 朱佳. 正压浓相气力输灰系统及应用分析 [J]. 人民长江, 2008, (07): 50-51.
- [8] 陈志超. 正压浓相气力除灰系统出现的问题及解决措施 [J]. 发电设备, 2006, (03): 178-180.
- [9] 蒋丽华, 顾源, 杨红. 浓相气力除灰系统堵塞的原因及处理 [J]. 重庆电力高等专科学校学报, 2003, (03): 50-53.
- [10] 林朝扶, 容严. 气力输灰系统堵管的分析与对策 [J]. 电力环境保护, 2003, (01): 40-42.

# 电厂工程施工中的环境影响评估与减缓措施探讨

李贺

中国能源建设集团安徽省电力设计院有限公司, 安徽 合肥 230000

DOI:10.61369/EPTSM.2025040018

**摘 要 :** 随着我国能源需求的不断增长, 电厂工程建设项目日益增多, 其施工阶段对生态环境的影响不容忽视。本文从电厂施工过程中可能产生的环境影响入手, 结合典型案例分析, 探讨了大气、水体、噪声及生态方面的环境问题, 并提出针对性的减缓对策。通过科学合理的环境影响评估与有效管理措施, 可以在确保工程进度与质量的同时, 实现环境保护与工程建设的协调发展, 为后续类似工程提供参考依据。

**关 键 词 :** 电厂施工; 环境影响评估; 减缓措施; 生态保护; 可持续发展

## Environmental Impact Assessment and Mitigation Measures in Power Plant Construction

Li He

China Energy Engineering Group Anhui Electric Power Design Institute Co., Ltd., Hefei, Anhui 230000

**Abstract :** With the continuous growth of China's energy demand, power plant construction projects are increasing, and their impact on the ecological environment during the construction phase cannot be ignored. Starting from the possible environmental impacts during the construction of power plants, this paper explores environmental issues related to air, water, noise, and ecology through typical case studies, and proposes targeted mitigation measures. Through scientific and reasonable environmental impact assessment and effective management measures, it is possible to ensure the progress and quality of the project while achieving coordinated development between environmental protection and engineering construction, providing a reference for similar projects in the future.

**Keywords :** power plant construction; environmental impact assessment; mitigation measures; ecological protection; sustainable development

### 引言

电厂作为大型基础设施, 其施工阶段对环境产生的影响广泛而深远。当前, 环境保护已成为工程建设不可或缺的一部分。本文从施工阶段的实际问题出发, 系统探讨环境影响的类型及成因, 重点分析如何通过评估机制与技术措施降低对环境的冲击, 为绿色施工提供理论与实践支持。

### 一、电厂工程施工对环境的主要影响

#### (一) 大气污染问题

电厂工程施工阶段的大气污染主要来源于施工扬尘、运输车辆尾气排放以及机械设备作业排放。土方作业、场地平整、道路开挖等活动会产生大量的粉尘颗粒, 在风力作用下形成大范围扩散, 严重影响施工现场及周边区域的空气质量。同时, 大量施工机械如推土机、挖掘机、混凝土搅拌机等使用柴油作为燃料, 在作业过程中排放大量含氮氧化物、碳氢化合物及颗粒物的尾气, 不仅造成空气污染, 还对施工人员和周边居民的健康构成威胁。此外, 运输车辆频繁进出工地, 车速较快且未覆盖密闭的物料运输, 也会扬起路面尘土, 加剧二次污染。由于施工周期长、作业面广, 如果不采取有

效的控制措施, 大气污染将持续存在并产生累积性影响, 特别是在干燥季节和风力较大的地区, 其影响更加显著。

#### (二) 水资源影响

电厂施工过程中对水资源的影响主要表现在水体污染和水资源浪费两个方面。首先, 在施工过程中会产生大量含泥浆、油污、化学添加剂等成分的废水, 这些未经处理直接排入地表水体或渗入地下水, 极易引发水质恶化, 甚至破坏周边水生态系统。尤其是在靠近河流、湖泊或地下水资源丰富的地区, 若无完善的排水和处理设施, 将导致水体富营养化、重金属污染等严重后果。其次, 施工过程中对水的需求量较大, 常用于混凝土搅拌、材料养护、场地冲洗及生活用水等, 若缺乏科学用水计划和节水技术, 极易造成水资源浪费。此外, 部分施工单位对雨污排放系统设计不当, 易在暴雨天



气导致雨污混流，进一步加剧对周边水体的污染。水资源作为生态系统的重要组成部分，其污染影响具有隐蔽性和持久性，往往在工程结束后仍会对生态环境造成长期影响。

### （三）噪声与生态破坏

电厂施工期间，噪声污染主要来自工程机械的高强度运转、爆破作业以及运输车辆的频繁出入。不同于一般建设项目，电厂施工设备功率大、持续时间长，常伴随强烈的机械震动和噪音，施工强度的增加直接提高了噪声的分贝水平。长期高强度噪声不仅影响施工人员的身心健康，还会扰乱周边居民的正常生活，甚至诱发心理压力、失眠和听力下降等健康问题。另一方面，电厂施工选址往往占地面积广，涉及土地平整、挖掘基础、植被清除等活动，易造成自然生态系统破坏。原有的植被群落被大面积破坏，导致土壤结构退化、水土流失加剧，同时也破坏了区域内生物的生存环境与栖息地，尤其是对小型哺乳动物、昆虫及鸟类的栖息地造成不可逆损害。生态破坏所带来的连锁反应可能影响区域生物多样性与自然调节机制，从而降低整个生态系统的稳定性与恢复力。因此，噪声污染与生态破坏已成为电厂工程施工中不可忽视的环境问题。

## 二、环境影响评估体系构建

### （一）环评内容与技术路线

环境影响评估体系是确保电厂施工项目绿色发展和环境保护目标实现的重要工具。其主要内容包括大气、水体、噪声、生态环境及社会影响等方面的系统调查与预测分析。首先，应全面识别施工活动各阶段可能产生的污染源及其作用路径，明确评价范围与重点区域。其次，通过实地踏勘、数据采样与历史资料分析，建立施工区域现状环境质量数据库，为后续预测提供基础数据支持。在技术路线方面，通常采取“现状调查—预测分析—影响评价—对策建议”的闭环式评估流程。其中，现状调查要涵盖周边居民、敏感目标、自然生态、基础设施等信息；预测分析则需借助专业模型评估污染物扩散趋势和生态干扰程度；最终通过专家咨询和公众参与，提出科学合理的环境保护措施和工程调整建议。合理的技术路线不仅提升环评科学性，也为项目顺利实施提供决策依据。

### （二）评估方法与模型

环境影响评估中采用的技术方法和模型对预测结果的准确性具有决定性作用。首先，大气环境影响多采用扩散模型如 AERMOD、CALPUFF 等进行污染物空间分布预测，能够模拟不同气象条件下的扩散行为，评估是否达到国家排放标准。水环境方面则运用水动力—水质模型如 MIKE 系列或 EFDC，模拟施工废水对地表水体和地下水的影 响路径及浓度变化趋势。噪声影响评价中则使用声功率级预测法或等效声级叠加法，结合施工设备类型与分布进行定点模拟，评估是否超出临界噪声限值。在生态影响评价方面，运用生态敏感性分析法、生态完整性评价法等对生态系统干扰程度进行定量分析。此外，综合评价中还常用风险矩阵分析法、多指标加权法、层次分析法（AHP）等方法，对

各类环境影响因素进行排序和重要性权重分配，从而提出优化方案。这些方法和模型的科学选择与合理应用，是提高评估准确性与实用性的重要保障。

### （三）案例分析与评估实证

为增强环评体系的实用性和针对性，应以典型电厂项目为案例开展评估实证研究。以某沿江火电厂建设项目为例，其施工区域位于河流下游生态敏感带，项目组通过全面布点监测与现状调查，识别出施工扬尘、水体扰动和噪声扩散为主要环境风险。在大气预测中，采用 CALPUFF 模型结合历史气象数据分析了施工期间不同阶段粉尘浓度分布图；在水环境方面，通过 MIKE 11 模拟施工废水排放对邻近河段水质的瞬时与长时变化趋势，发现施工废水若未经处理将显著提高氨氮与悬浮物浓度；而噪声评估则表明在无隔音措施条件下，夜间施工将超出国家 2 类声环境标准，需采取限时作业与隔音屏障措施。最终，该项目提出了包括设置施工沉淀池、密闭运输系统、生态绿化带等综合减缓方案，并经环境管理部门审核通过。此类案例不仅验证了评估体系的有效性，也为同类工程提供了可复制的经验模板，推动环评由理论向实践落地。

## 三、施工阶段减缓环境影响的技术措施

### （一）大气污染防治措施

在电厂施工过程中，为有效控制大气污染，需从源头削减、过程控制与末端治理三方面入手。首先，对于易产生扬尘的作业区域如土方开挖、材料堆放和道路运输，应采取覆盖、洒水降尘、硬化地面等措施，尤其在干旱多风季节加密洒水频次，防止粉尘大面积扩散。其次，对进出工地的运输车辆进行清洗，并严格要求物料运输车辆封闭覆盖，避免在行驶过程中扬尘污染。同时，选用符合国家排放标准的低排放施工机械，优先使用电动或天然气驱动设备，减少尾气排放量。在施工现场设立空气质量监测点，实时掌握 PM2.5、PM10 等污染物浓度变化，便于及时采取应急响应。此外，可结合气象条件，科学安排施工时间，如在高温无风或逆温条件下暂停易产生尘作业，以降低污染物的聚集程度。通过制度化管理与技术手段的有机结合，有效减少施工期间对大气环境的影响。

### （二）水体污染治理策略

水体污染的防治重点在于控制施工废水的排放与处理。施工现场应设立专门的污水收集系统，对不同类型的废水进行分类处理。混凝土搅拌废水、车辆清洗水和生活污水不可混流，应分别引入沉淀池、隔油池等设施进行预处理，待达标后统一排放或回用。雨季施工时，应强化排水管理，设立雨污分流管道，防止雨水冲刷造成含泥土及污染物的地表径流直接流入周边河道。对于靠近水源地的项目，应设置施工隔离带，防止废水渗漏或事故泄漏造成地下水污染。在特殊区域可采用循环用水系统，将处理后的水用于设备冷却或洒水降尘，实现水资源的多级利用与零排放目标。对重要水体应实施重点保护监测，安排专人巡查水质变化并建立应急处理机制，如在发生污染风险时启用应急池和临时截

留措施。通过全流程水体污染治理策略，不仅提升环保水平，也增强工程的可持续性和公众认可度。

（三）噪声与生态保护方案

控制噪声污染与保护生态环境是电厂绿色施工的重要组成部分。在噪声治理方面，首先应合理安排施工作业时间，限制高噪声设备在夜间运行，避免对周边居民生活造成干扰；其次，对施工现场应设置移动隔音屏障或吸声材料围挡，尤其在靠近敏感建筑物一侧加密布置降噪设施。对声源强烈的设备，如混凝土泵、打桩机等，应选用低噪型设备并远离居民区设置作业区。同时，要求施工人员佩戴个人防护设备，保障其职业健康。在生态保护方面，施工前应开展生态现状调查与评估，划定生态敏感区并设置物理隔离，避免误伤野生动植物及破坏自然植被。对必须占用的绿地、林地等生态用地，应制定植被恢复计划，施工后及时进行绿化补种、土地平整与水土保持工程。对于局部受损生态系统，还可引入生态补偿机制，通过人工湿地、生态廊道等方式修复生态功能。综合施策之下，可在保障工程进度的同时有效实现噪声控制与生态安全的双重目标。

四、管理与政策支持建议

（一）环保监管机制建设

健全的环保监管机制是保障电厂施工过程环境可控、风险可控的制度基础。首先，应在项目立项初期引入全生命周期环境管理理念，从可行性研究、设计、施工到运营维护各阶段建立相应的环保监管框架，确保每个环节都有明确的环保责任与执行标准。其次，设立第三方环境监理单位，实施独立、专业的环境监控与评价，强化对环境管理执行情况的监督，避免因利益冲突导致监管流于形式。在施工现场，应安装在线监测系统，实时监控扬尘浓度、噪声强度、废水排放等关键指标，数据同步上传至环保管理平台，实现监管信息化、可视化。同时，推行环保“红黄牌”机制，对环保不达标行为实行限期整改、通报批评、暂停施工甚至行政处罚，提升监管威慑力。对于重点区域和敏感项目，建议实施驻点监管制度，确保发现问题及时处理、责任到人。环保监管还应与工程质量、安全生产等体系相融合，形成多层次、多角度的综合管理网络。

（二）企业环保意识提升

企业作为环境保护执行的第一责任主体，其环保意识的高低直

接决定施工环保措施的落实效果。首先，应通过定期开展环保教育培训、案例警示教育等方式，提高企业管理层与一线员工对环境问题的认知程度和法律意识，转变“被动应付”到“主动作为”的环保理念。其次，企业应设立专职环保管理部门或岗位，完善岗位职责与考核制度，将环保目标纳入项目绩效评价体系，增强员工履职的积极性与执行力。在日常施工管理中，鼓励环保创新，如推广使用节能型设备、绿色建材、可再利用材料等，将环保技术与降本增效相结合，提高环保的经济吸引力。此外，企业还应加强与地方政府、环保机构、科研单位的合作，借助外部资源优化施工环保方案与监测手段。通过制度引导与文化塑造并重，不断提高企业环保意识水平，为施工现场环境管理提供内生动力。

（三）政策法规与激励机制

完善的政策法规体系与合理的激励机制是推进环保责任落地的关键保障。首先，应细化与更新施工阶段相关的环境保护法规与技术规范，强化法律适用性与针对性，如明确施工废水排放标准、扬尘治理规范、生态恢复要求等，使企业在执行过程中有章可循、有标可依。其次，加强执法联动机制，推动住建、生态环境、水务等部门协同监管，对违法行为依法依规严惩，提升法规震慑力。在此基础上，可建立绿色施工评级制度，依据企业在环保执行中的表现授予“绿色工地”“环保示范项目”等称号，并在资质评审、招投标、政策补贴等方面给予优先考虑，形成正向激励。同时，对使用环保技术、实施超额减排、参与生态修复的项目给予财政补贴、税收减免等政策支持，激发企业的环保积极性。政府还可设立专项环保发展基金，支持施工单位开展环保技术研发与绿色转型。通过制度刚性与政策柔性的双轮驱动，全面提升电厂施工阶段的环境治理水平，实现经济发展与生态保护的有机统一。

五、结语

电厂工程施工过程中不可避免地对大气、水体、噪声及生态环境造成一定影响，但通过科学的环境影响评估体系与有效的减缓技术措施，这些问题完全可以被控制在合理范围内。同时，健全的环保监管机制、企业环保意识的提升及政策法规的有力支撑，共同构建起绿色施工的保障体系。实现工程建设与生态保护的协调发展，不仅是响应国家可持续发展战略的具体体现，也是推动电力行业绿色转型升级的必由之路。

参考文献

[1] 吴先勇. 基于模糊层次分析法的海外电力工程项目风险评价分析 [D]. 南昌大学, 2017.  
[2] 杨辰. EPC 模式下燃油电厂施工质量控制方法及实证研究 [D]. 华北电力大学 (北京), 2018.  
[3] 李连川. 漳泽 1000MW 工程施工风险分析与控制对策研究 [D]. 南京航空航天大学, 2020.DOI:10.27239/d.cnki.gnhhu.2020.000921.  
[4] 彭桃. 中国企业海外 BOT 火电项目投资风险管理研究 [D]. 西南财经大学, 2021.DOI:10.27412/d.cnki.gxncu.2021.000872.  
[5] 朱震. 发电厂 60 万千瓦发电机 A 级检修施工安全风险研究 [D]. 华侨大学, 2023.DOI:10.27155/d.cnki.ghqiu.2023.001604.  
[6] 杨洋. “双碳”目标下电力工程项目风险管理研究 [D]. 安徽理工大学, 2023.DOI:10.26918/d.cnki.ghngc.2023.000047.  
[7] 陈慧敏. 阳源光伏电厂工程项目风险管理研究 [D]. 哈尔滨理工大学, 2023.DOI:10.27063/d.cnki.ghlgu.2023.000795.  
[8] 朱绍勤. F 设计企业国际工程总承包项目投标影响因素及策略研究 [D]. 广州大学, 2024.DOI:10.27040/d.cnki.ggzdu.2024.001055.  
[9] 姚玉芝. 基于岗位价值评估的电厂 EPC 总承包项目人力资源配置优化研究 [D]. 华南理工大学, 2023.DOI:10.27151/d.cnki.ghnlu.2023.005840.  
[10] 李珍珍. 电厂东路工程造价风险评估与应对策略研究 [D]. 青岛大学, 2021.DOI:10.27262/d.cnki.gqdau.2021.000525.